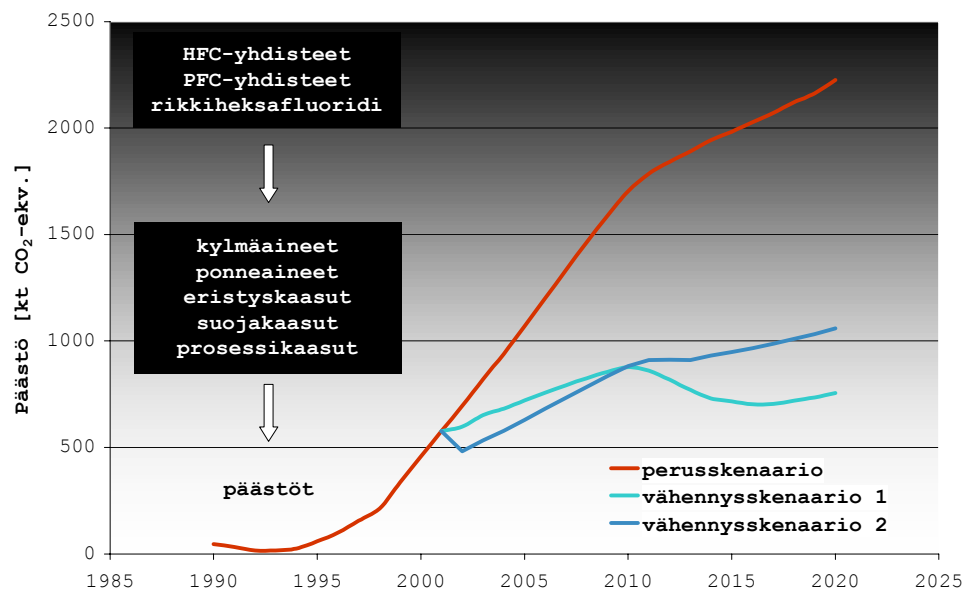


Teemu Oinonen & Sampo Soimakallio

HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa



CLIMTECH

HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa

Teemu Oinonen
Suomen ympäristökeskus

Sampo Soimakallio
VTT Energia



ISBN 951-38-5839-1 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5900-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2001

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energiajärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2001

Oinonen, Teemu & Soimakallio, Sampo. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa [Technical and economic evaluation of emission abatement options of HFCs, PFCs and SF₆. The case of Finland]. Espoo 2001, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2099. 154 s. + liitt. 17 s.

Avainsanat greenhouse gases, emissions, abatement, Finland, organic halogen compounds, hydrocarbons, sulfur fluorides, technology, economy, refrigerating equipment

Tiivistelmä

Uusien kasviuonekaasujen, HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä rikkiheksafluoridin (SF₆), päästöjen ennakoitaan kasvavan maailmanlaajuisesti seuraavien vuosikymmenien aikana. Päästöjen lähteissä, määrissä ja kehitysennusteissa on eri maiden välillä huomattavia eroja, jotka riippuvat pääasiassa maiden teollisuuden rakenteesta ja otsonia heikentävien yhdisteiden käytön korvautumisesta HFC- ja PFC-yhdisteillä. Tässä selvityksessä tarkastellaan Suomen uusien kasviuonekaasujen päästöjen kehittymistä lähitulevaisuudessa sekä siitä johtuvaa päästöjen vähennystarvetta. Päästöjen vähennysmenetelminä tarkasteltiin erilaisten teknisten toimenpiteiden soveltuvuutta sekä niiden avulla saavutettavaa päästövähennyspotentiaalia ja toimenpiteistä aiheutuvia kustannuksia.

Suomessa uusien kasviuonekaasujen päästöt ovat tällä hetkellä noin 0,5 Mt CO₂-ekvivalenttia. Päästöjen arvioitiin kasvavan noin nelinkertaisiksi vuoteen 2010 ja noin viisinkertaisiksi vuoteen 2020 mennessä, jolloin niiden osuus kaikkien Kioton pöytäkirjan alaisten kasviuonekaasujen päästöistä olisi paljon nykyistä suurempi. Suomessa päästöjen ennakoituun kasvuun vaikuttaa merkittävimmin otsonia heikentävien kylmäaineiden käytön korvautuminen pääasiassa HFC-yhdisteistä koostuvilla kylmäaineilla, joiden päästöjen arvioitiin muodostavan lähes 90 % yhteenlasketuista uusien kaasujen päästöistä kuluvan vuosituhattoisen toisella vuosikymmenellä.

Päästövähennystoimenpiteiden soveltaminen käytössä olevaan laitekantaan on yleensä tehottomampaa ja ongelmallisempaa kuin sovellettaessa vastaavanlaisia toimia uuteen laitekantaan. Tästä syystä päästöjen vähennyspotentiaali on osittain sidoksissa toimien käyttöönottoaikatauluun. Tässä selvityksessä toimenpiteiden käyttöönotto ajoitettiin pääsääntöisesti vuoden 2002 alkuun ja toimenpiteinä arvioitiin kahta erityyppistä teknistä menetelmää, joista toinen liittyy käytettävän tekniikan tai päästöjä aiheuttavien yhdisteiden korvaamiseen ja toinen kaasuvuotojen vähentämiseen. HFC-kylmäaineiden tarvetta vähentävien teknisten ratkaisujen toteuttaminen osoittautui selvästi kalliimmaksi vaihtoehdoksi kuin vuotojen vähentäminen, jolle päästövähennyksellä painotettujen keskimääräisten arvioitiin olevan noin 80 mk/t CO₂-ekv. Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella (2008–2012) ja noin 60 mk/t CO₂-ekv. vuonna 2020. Vaihtoehtoisilla tekniikoilla ja aineilla arvioitiin saavutettavan suurempia päästövähennyksiä kuin vuotoja vähentämällä, mutta niiden soveltuvuus on myös selvästi rajoitetumpi. Yhteenlaskettuna eri toimilla saavutettavat päästövähennykset arvioitiin Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella noin 50 %:ksi ja vuonna 2020 noin 50–65 %:ksi uusien kaasujen päästöistä.

Oinonen, Teemu & Soimakallio, Sampo. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa [Technical and economic evaluation of emission abatement options of HFCs, PFCs and SF₆. The case of Finland]. Espoo 2001, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2099. 154 p. + app. 17 p.

Keywords greenhouse gases, emissions, abatement, Finland, organic halogen compounds, hydrocarbons, sulfur fluorides, technology, economy, refrigerating equipment

Abstract

Emissions of the so called new greenhouse gases – HFCs, PFCs and SF₆ – are expected to grow globally in the near future. Sources, magnitudes and projections of future emissions differ significantly between countries, mainly due to structural differences between countries' industries, as well as the rate and phase of the substitution of ozone depleting substances by HFCs and PFCs. This study focuses on Finnish emissions of the new greenhouse gases, the projected growth in emissions, and the resulting need to reduce these emissions.

Currently, emissions of new greenhouse gases amount to some 0.5 Mt of CO₂-eq. in Finland. Emissions are expected to quadruple by 2010 and to be five-fold by 2020, at which time they represent a much larger share of Finnish emissions of Kyoto greenhouse gases than presently. The substitution of ozone depleting substances by HFC-refrigerants was indentified as a major driver behind the expected growth of emissions. After the first Kyoto commitment period, emissions of HFC-refrigerants were projected to contribute some 90% of the total emissions of new greehouse gases in Finland.

The application of emission reduction technologies to an existing equipment base is usually more problematic and less effective than applying these technologies to new equipment. For this reason, the emission reduction potential is conditional on schedule of introducing abatement measures. In the calculations of this study, most of the abatement measures were introduced in 2002. The measures considered consisted mainly of two kinds of technical reduction options: i) alternative gases and technologies and ii) leakage reduction (containment). Measures focusing on application of alternatives were significantly more expensive compared to leakage reduction. Average abatement costs of leakage reduction, weighted by potential emission reductions, were estimated as 80 FIM/t CO₂-eq. during the first Kyoto commitment period and 60 FIM/t CO₂-eq. in 2020. Greater potential emission reductions would be achievable using alternative gases and technologies, but their applicability to different emission sources is clearly more limited. The total emission reduction potential for the new greenhouse gases was estimated as 50% for the first Kyoto commitment period and 50–65% in 2020.

Alkusanat

Selvitys tehtiin VTT Energian ja Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) kemikaaliyksikön yhteisprojektina ja toteutettiin osana Tekesin Teknologia ja ilmastonmuutos-ohjelmaa (Climtech). Ohjelman tavoitteena on edistää ilmastonmuutoksen hallintaa sekä kansallisten ja kansainvälisten ilmastotavoitteiden saavuttamista tukemalla ilmastonmuutosta rajoittavan teknologian valintoja, tutkimusta, kehitystä, kaupallistumista ja käyttöönottoa. Samalla ohjelma edistää suomalaisen teollisuuden mahdollisuuksia hyödyntää ilmastonmuutoksen rajoittamisen tarjoamaa liiketoimintamahdollisuutta. Climtech-ohjelman ohjausryhmän puheenjohtajana toimii Tekesin teknologia-asiantuntija Raija Pikku-Pyhältö.

Projektiryhmään kuuluivat Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksiköstä Msc, ins. Teemu Oinonen ja maat. metsät. maist. Jukka Malm sekä VTT energiasta tekn. yo Sampo Soimakallio ja tekn. tri Riitta Pipatti, joka toimi projektin vastuullisena johtajana. Selvityksen kirjoittamisesta vastasivat Sampo Soimakallio ja Teemu Oinonen.

Tekijät haluavat kiittää rahoittajia sekä koko projektiryhmää sujuvasti toimineesta yhteistyöstä. Kiitokset niille lukuisille yrityksille ja teollisuusorganisaatioille, joiden antamien tietojen perusteella työn toteutus oli mahdollista. Kiitokset myös kaikille niille useille yhteisöille ja henkilöille, jotka ovat osaltaan auttaneet selvityksen työstämisessä ja kommentoinnissa. Erityisesti tekijät haluavat kiittää Esko Kaappolaa (Danfoss Oy), Jarmo Elovaaraa (Finngrid Oyj), Marko Riipistä (Helsingin Energia Oyj), Mauri Riikosta (Suomen Tasolasi Oy), Markku Orpanaa (Micro Analog Systems Oy) ja Ritva Hirvosta (VTT Energia).

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	11
2. Suomen päästölähteet kansainvälisessä vertailussa.....	14
3. Päästöjen ja kustannusten arvioinnin metodologia.....	18
3.1 Eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutusten vertailu.....	18
3.2 Päästöjen arviointi ja skenaarioiden laatiminen.....	19
3.2.1 Perusskenaarioiden päästöjen mallintaminen.....	21
3.2.2 Päästövähennysskenaarioiden päästöjen mallintaminen.....	22
3.2.3 Skenaarioiden lähtötiedot.....	24
3.3 Päästövähennystoimet ja kustannusten arviointi.....	24
3.3.1 Päästövähennystoimien valinta.....	24
3.3.2 Päästövähennyskustannusten laskenta.....	26
4. Päästösektorien tarkastelu.....	28
4.1 Kylmä- ja ilmastointilaitteet sekä lämpöpumput.....	28
4.1.1 Yleistä.....	28
4.1.2 Kylmähöyryprosessit.....	29
4.1.3 Kylmähöyryprosessien kylmäaineet.....	32
4.1.3.1 Hiilivedyt (HC).....	33
4.1.3.2 Ammoniakki (NH ₃).....	33
4.1.3.3 Hiilidioksidi (CO ₂).....	34
4.1.3.4 Vesi (H ₂ O).....	35
4.1.4 Teknisten päästövähennysmenetelmien periaatteet.....	35
4.1.4.1 Vaihtoehtoiset kylmätekniikat.....	36
4.1.4.2 Vaihtoehtoiset kylmäaineet.....	38
4.1.4.3 Päästöjen hallinta ja parannettu laitekonstruktio.....	38
4.1.5 Kodin kylmlaitteet.....	40
4.1.5.1 Yleistä.....	40
4.1.5.2 Perusskenaario.....	40
4.1.5.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot.....	41
4.1.5.4 Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset.....	42
4.1.6 Kaupan kylmlaitokset.....	43
4.1.6.1 Yleistä.....	43

4.1.6.2	Perusskenaario	45
4.1.6.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	46
4.1.6.4	Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset	47
4.1.7	Elintarvike- ja prosessiteollisuuden kylmälaitokset	50
4.1.7.1	Yleistä	50
4.1.7.2	Perusskenaariot	51
4.1.7.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	51
4.1.7.4	Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset	52
4.1.8	Jääradat	56
4.1.8.1	Yleistä	56
4.1.8.2	Perusskenaario	56
4.1.8.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	57
4.1.8.4	Päästövähennysskenaario ja -kustannukset	57
4.1.9	Ammattikeittiöiden kylmälaitokset ja omakoneelliset kylmäkalusteet ...	59
4.1.9.1	Yleistä	59
4.1.9.2	Perusskenaariot	59
4.1.9.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	61
4.1.9.4	Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset	62
4.1.10	Kylmäkuljetuslaitteet	63
4.1.10.1	Yleistä	63
4.1.10.2	Perusskenaario	64
4.1.10.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	65
4.1.10.4	Päästövähennysskenaario ja -kustannukset	65
4.1.11	Kiinteät ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät	67
4.1.11.1	Yleistä	67
4.1.11.2	Perusskenaario	69
4.1.11.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	70
4.1.11.4	Päästövähennysskenaario ja -kustannukset	72
4.1.12	Ajoneuvojen ilmastointilaitteet	75
4.1.12.1	Yleistä	75
4.1.12.2	Perusskenaario	76
4.1.12.3	Päästöjen vähennysmenetelmät ja kustannusarviot	77
4.1.12.4	Päästövähennysskenaario	80
4.1.13	Lämpöpumput	83
4.1.13.1	Yleistä	83
4.1.13.2	Perusskenaario pientalojen lämpöpumpuille	85
4.1.13.3	Perusskenaario muille lämpöpumpuille	87
4.1.13.4	Päästövähennysmenetelmät	89
4.2	Solumuovit ja saumaeriste	89
4.2.1	Yleistä	89
4.2.2	Vaahdotusaineet	90

4.2.2.1	Hiilivedyt	91
4.2.2.2	Hiilidioksidi CO ₂	92
4.2.2.3	HFC-yhdisteet ja seokset	92
4.2.3	Sovelluskohteet	93
4.2.4	Perusskenaario	94
4.2.5	Päästövähennysmenetelmät ja -kustannukset	96
4.3	Aerosolit	98
4.3.1	Yleistä	98
4.3.2	Inhalaatiosumutteet	99
4.3.2.1	Perusskenaario	100
4.3.2.2	Päästövähennysmenetelmät	101
4.3.3	Tekniset aerosolit	101
4.3.3.1	Perusskenaario	102
4.3.3.2	Päästövähennysmenetelmät	103
4.4	Liuottimet	103
4.5	Sammutuslaitteet	104
4.5.1	Yleistä	104
4.5.2	Perusskenaario	105
4.6	Puolijohdteollisuus	106
4.6.1	Yleistä	106
4.6.2	Perusskenaario	108
4.6.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	109
4.6.3.1	CVD-kammion puhdistusprosessi	110
4.6.3.2	Etsausprosessi	110
4.6.3.3	Päästöjen hallinta	111
4.6.4	Päästövähennysskenaario ja -kustannukset	112
4.7	Muut PFC-päästölähteet	112
4.8	Magnesiumin painevalu	113
4.8.1	Yleistä	113
4.8.2	Perusskenaario	114
4.8.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	115
4.9	Sähkölaitteet	115
4.9.1	Yleistä	115
4.9.1.1	Kytkinlaitokset	116
4.9.1.2	Katkaisijat	117
4.9.2	Perusskenaario	118
4.9.3	Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot	120
4.9.3.1	Vaihtoehtoiset tekniikat	120
4.9.3.2	Täytöksen pienentäminen	121
4.9.3.3	Päästöjen hallinta	122
4.9.4	Päästövähennysskenaario ja -kustannukset	123

4.10 Muut SF ₆ -päästölähteet	124
5. Uusien kaasujen päästövähennyspotentiaali ja -kustannukset.....	126
5.1 Perus- ja vähennysskenaarioiden kokonaispäästöt.....	126
5.2 Päästövähennyskustannukset.....	130
6. Päästövähennystoimien yritysvaikutuksista.....	134
6.1 Vaikutukset toimenpiteitä käyttöönottaaviin yrityksiin	134
6.2 Vaikutukset muihin yritystyyppihin	135
7. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	139
8. Jatkotutkimustarpeet	142
Lähdeluettelo	144

LIITTEET

Liite A: Halogenoitujen yhdisteiden ominaisuuksia

Liite B: Kylmäaineet

Liite C: Kodinkylmälaitteiden myynti Suomessa vuosina 1990–1998 ja arvioitu ennuste vuoteen 2010

Liite D: Tyypillisen eurooppalaisen kodin jääkaapin päästötasearvioita tällä hetkellä markkinoilla oleville eriste- ja kylmäainevaihtoehdoille

Liite E: Tyypillisen eurooppalaisen kaupan kylmälaitoksen päästötasearvioita erilaisille toteutusvaihtoehdoille

Liite F: Uusien ajoneuvojen rekisteröinti ja ilmastointilaitteiden osuus Suomessa vuosina 1990–1999 ja ennusteet vuoteen 2020

Liite G: Keskikokoisen henkilöauton ilmastointilaitteen päästötasearvioita erilaisissa ilmastollisissa olosuhteissa

Liite H: Solumuovit

Liite I: Sähkölaitteiden vaihtoehtoisia eristyskaasuja

Liite J: Elinkaarianalyysivertailu kaupunkisähkön jakelun toteuttamisesta GIS- tai AIS-laitoksilla

Liite K: Seoskaasujen sähkölujuus ja katkaisukyky

1. Johdanto

Halogenoidut kasvihuonekaasut ovat teollisuusperäisiä yhdisteitä, jotka sisältävät fluoria, klooria, bromia tai jodia ja joilla on kyky absorboida maapallon lähettämää pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Halogenoiduissa hiilivety-yhdisteissä yksi tai useampi vetyatomeista on korvattu halogeeneilla. Täysin halogenoiduissa hiilivedyissä kaikki hiili-vetysidokset on korvattu hiili-halogeenisidoksilla. Useimmat synteettiset halogenoidut hiilivedyt ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja ja lisäksi klooria ja bromia sisältävät tuhoavat stratosfäärin otsonia.

Wienissä 1985 solmitun otsonikerroksen suojelusopimuksen Montrealin pöytäkirja (1987) lisäyksineen rajoittaa yläilmakehän otsonia tuhoavien aineiden tuotantoa ja kulutusta. Montrealin pöytäkirja vaatii kaikkien siinä mainittujen aineiden tuotannon ja kulutuksen täydellistä lopettamista sekä teollisuus- että kehitysmaissa vaihtelevin aikatauluin. Rajoitettaviin aineisiin kuuluvat muun muassa täysin halogenoidut kloorifluorihilivedyt (CFC-yhdisteet), osittain halogenoidut kloorifluorihilivedyt (HCFC-yhdisteet) ja täysin halogenoidut bromiyhdisteet (halonit). Näiden aineiden suhteellisen nopean käytöstä poistamisen ovat osittain mahdollistaneet niitä korvaamaan kehitetyt fluorihiilivedyt (HFC-yhdisteet) ja perfluorihiilivedyt (PFC-yhdisteet).

YK:n ilmastonmuutosta koskevan puitesopimuksen (Rio 1992) alainen Kioton pöytäkirja (1997) velvoittaa teollisuusmaita vähentämään siihen sisällytettyjen kasvihuonekaasujen yhteenlaskettuja hiilidioksidi-ekvivalenteja päästöjä 5,2 % vuosiin 2008–2012 mennessä. Pöytäkirjaan sisällytettiin hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄) ja typpioksiduulin (N₂O) lisäksi HFC- ja PFC-yhdisteet sekä rikkiheksafluoridi (SF₆). Kolmen ensin mainitun osalta vertailuvuosi on 1990, HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n osalta pöytäkirjan osapuolen valinnan mukaan 1990 tai 1995 (Suomella 1990).

Uusilla halogenoiduilla hiilivedyillä ja rikkiheksafluoridilla on lukuisia ominaisuuksia, jotka puoltavat niiden käyttöä monessa eri sovelluksessa. Ne ovat usein kemiallisesti stabiileja ja palamattomia. HFC- ja PFC-yhdisteet ovat monesti parhaiten soveltuvia tai parhaita vaihtoehtoja kohteisiin, joissa on aiemmin käytetty yläilmakehän otsonia tuhoavia yhdisteitä. Maailmanlaajuisesti HFC- ja PFC-yhdisteitä käytetään määrällisesti eniten kylmäaineina. Vähäisempiä määriä kulutetaan muun muassa liuottimissa ja sammutusaineena automaattisissa palontorjuntalaitteissa. Täysin uusi käyttökohde on puolijohteiden valmistus. HFC-yhdisteitä käytetään myös aerosolien ja solumuovien punneaineena. Rikkiheksafluoridia ei käytetä otsonia heikentävien aineiden korvaajana lukuun ottamatta vähäistä käyttöä joidenkin halonien korvaajana sammutuslaitteissa.

Sen pääasiallisin käyttökohde ovat kaasueristetyt sähkölaitteet. SF₆ on voimakkain tunnettu kasvihuonekaasu¹.

Uusien kasvihuonekaasujen päästölähteet poikkeavat teknisesti merkittävästi toisistaan. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n kulutus ja siitä aiheutuvat päästöt jakautuvat ajallisesti hyvinkin eri tavoilla sovelluksesta riippuen. Erot yhdisteiden kulutuksessa, sovelluskohteissa ja päästöjen hallinnassa ovat suuria eri maiden ja loppukäyttäjien välillä. Globaalisti uusien kaasujen osuus kaikista ihmisen toiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä on noin 2 %. Suomessa uusien kaasujen päästöt ovat nykyisin arviolta 0,5 Mt hiilidioksidi-ekvivalenttia, joka vastaa noin 0,6 % Suomen yhteenlasketuista Kioton pöytäkirjan mukaisista kasvihuonekaasupäästöistä. Arvo on yli 50 % pienempi kuin kaasujen nykyinen kulutus. Päästöjen arvioidaan kasvavan vuoteen 2010 mennessä noin 1,7 Mt CO₂-ekvivalenttiin, jolloin niiden merkitys kokonaisuuteen nähden olisi paljon nykyistä suurempi.

Uusien kasvihuonekaasujen päästöihin voidaan vaikuttaa useilla erilaisilla mekanismeilla, jotka eivät ole toisiaan pois sulkevia vaan pikemminkin toisiaan täydentäviä tai tukevia. Päästöjä aiheuttavien yhdisteiden kulutusta voidaan vähentää erilaisilla hallinnollisilla toimilla, kuten asettamalla määräyksiä, rajoitteita, kieltoja tai päästövähennystoimien kannustimia. Toimien soveltaminen käytäntöön vaatii usein teknisiä muutoksia laitteisiin, tuotteisiin tai prosesseihin. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjä voidaan pyrkiä hallitsemaan parantamalla järjestelmien tiiviyyttä sekä erilaisilla talteenotto-, kierrätys- ja hävitysmekanismeilla. Optimaalisella laitesuunnittelulla, esimerkiksi kylmälaitteiden kohdalla, voidaan minimoida järjestelmien tarvitsema ainemäärä. HFC- ja PFC-yhdisteet tai SF₆ voidaan myös pyrkiä korvaamaan vaihtoehtoisilla, kasvihuoneilmiön kannalta vähemmän haitallisilla tai haitattomilla yhdisteillä. Korvaus edellyttää usein vaihtoehtoisen tekniikan käyttöönottoa tai prosessimuutoksia.

Teknisten päästövähennystoimien käyttöönotto aiheuttaa usein kustannuksia, jotka saattavat vaikeuttaa toimen käyttöönoton yrityksen kilpailuasemaa. On myös mahdollista, että yritys hyötyy toimista, esimerkiksi yhdisteiden pienemmän kulutuksen tai syntyvän positiivisemmän yrityskuvan ansiosta. Vaihtoehtoisten tekniikoiden ja yhdisteiden käyttöönotto saattaa muuttaa laitteiden, tuotteiden ja prosessien suorituskykyä, laatua tai turvallisuutta. Huonompi suorituskyky voi johtaa lisääntyvään energiankulutukseen, jolloin menetelmällä saavutettava kokonaispäästövähennys on pienempi tai jopa negatiivinen. Laadun huononeminen puolestaan saattaa aiheuttaa

¹ SF₆:n lämmitysvaikutus on esimerkiksi sadan vuoden aikavälillä tarkasteltuna 23 900 kertaa voimakkampi kuin hiilidioksidin (ks. kohta 3.1).

hyväksyttävyy- tai turvallisuusongelmia, joita aiheutuu myös vaihtoehtoisten aineiden mahdollisesta syttyvyydestä tai myrkyllisyydestä.

Tässä työssä tarkasteltiin uusien kasvihuonekaasupäästöjen teknisiä vähennyskeinoja ja niihin liittyviä tekijöitä, kuten toteutettavuutta, kustannustehokkuutta ja turvallisuutta. Tarkastelu tehtiin yleisellä tasolla sekä Suomen tilanteeseen kohdistuen. Suomessa esiintymättömät päästölähteet ja muuntotyypiset päästövähennystoimet rajattiin työn ulkopuolelle.

Työn tavoitteena oli ensisijaisesti tarkentaa kuvaa erilaisten teknisten päästövähennystoimien käyttöönoton mahdollisuuksista ja kustannuksista sekä niiden merkityksestä saavutettavan kokonaispäästövähennyksen kannalta Suomessa. Päästövähennystoimien kustannustehokkuus ja vaikutukset alalla toimiviin suomalaisiin yrityksiin pyrittiin selvittämään. Tarkoituksena oli sellaisten päästövähennysmenetelmien löytäminen, jotka voisivat parhaiten auttaa Suomea saavuttamaan Kioton pöytäkirjassa asetetut tavoitteet ja joilla olisi verrattain pitkäaikaista vaikutusta ilmastonmuutoksen torjunnassa.

Työtä varten tehtiin laaja kirjallisuustutkimus pääasiassa kansainvälisiä selvityksiä hyväksi käyttäen. Kirjallisuustutkimuksessa tuotetun tiedon perusteella haastateltiin suomalaisia asiantuntijoita ja alan yritysten edustajia tiedon syventämiseksi sekä yritysten näkemysten kuulemiseksi. Selvityksessä hyödynnettiin Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikössä eri toiminnanharjoittajille laadittujen kyselyiden tuloksia. Saadun tiedon perusteella tarkennettiin Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikössä huhtikuussa 2000 laadittuja (Oinonen 2000) Suomen uusien kasvihuonekaasujen ensimmäisiä aktuaalisia päästöjä koskevia päästökehitysarvioita. Työssä laadittiin myös ensimmäiset Suomea koskevat teknisten toimenpiteiden käyttöönotolla saavutettavissa olevat päästövähennys- ja kustannusarviot.

2. Suomen päästölähteet kansainvälisessä vertailussa

Uudet kasvihuonekaasut – HFC- ja PFC-yhdisteet sekä rikkiheksafluoridi (SF₆) – muodostivat vuonna 1996 maailmanlaajuisesti päästöjä arviolta 300 Mt hiilidioksidiekvivalenttia. Määrä vastasi noin 0,9 %:a maailman kaikista ihmisen toiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (Harnisch et al. 2001). Uusien kasvihuonekaasujen yleisesti tunnetut lähteet luetellaan taulukossa 1.

Taulukko 1. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä rikkiheksafluoridin yleisesti tunnetut maailmanlaajuiset päästölähteet.

osittain fluorattujen hiilivetyjen (HFC) lähteet
<ul style="list-style-type: none">• HCFC-22:n tuotanto (sivutuotteena syntyvä HFC-23)• jäähdytys ja ilmastointi sekä lämpöpumput (kylmäaine)• solumuovit (ponne-, eristyskaasu)• aerosolit (ponnekaasu)• automaattiset sammutuslaitteet (sammute)• liuottimet (ponnekaasu, liuotin)• HFC-yhdisteiden valmistus ja jakelu (karkauspäästöt)• muut lähteet:<ul style="list-style-type: none">- puoliyohteiden valmistus (etsauskaasu)
perfluorihiiilivetyjen (PFC) lähteet
<ul style="list-style-type: none">• alumiinin valmistus• puoliyohteiden valmistus (etsauskaasu)• liuottimet (ponnekaasu, liuotin)• PFC-yhdisteiden valmistus ja jakelu (karkauspäästöt)• muut lähteet:<ul style="list-style-type: none">- sotateollisuuden keinoveri- lääketieteelliset ultraäänikokeet- erikoiskylmälaitteet- suksivahan valmistus- sammutuslaitteet (sammute)
rikkiheksafluoridin (SF₆) lähteet
<ul style="list-style-type: none">• sähkölaitteet (eristyskaasu)• magnesiumin valu (suojakaasu)• auton renkaat (täytekaasu)• äänieristetyt ikkunat (eristyskaasu)• SF₆:n valmistus ja jakelu (karkauspäästöt)• muut lähteet:<ul style="list-style-type: none">- ilmansaasteiden kartoitus (merkkiaine)- urheilujalkineiden pohjat (täytekaasu)- tennispallot (täytekaasu)- sotilastutkien aaltoputket (eristyskaasu)

Taulukossa 1 kursivilla esitettyjen päästölähteiden maailmanlaajuinen merkitys on hyvin vähäinen. Merkittävistä tai hyvin potentiaalisista päästölähteistä HCFC-22:n valmistusta, alumiinin tuotantoa, varsinaisten yhdisteiden valmistusta ja liuotinkäyttöä ei esiinny Suomessa lainkaan.

Teollisuusmaissa noin 80 % aikaisemmasta CFC-yhdisteiden ja halonien käytöstä on korvattu muilla yhdisteillä tai menetelmillä kuin fluoratuilla hiilivedyillä (UNEP 1999a). HFC-yhdisteet ovat korvanneet noin 8 % ja HCFC-yhdisteet noin 12 % tästä määrästä. Vastaavat arviot kehitysmaiden siirtymäkaudelle² ovat noin 7 % HFC- ja 17 % HCFC-yhdisteille (UNEP 1999a). IPCC:n IS92a-skenaarion mukaan otsonia heikentäviä yhdisteitä korvaavat HFC- ja PFC-yhdisteet eivät tule muodostamaan yli 2–3 %:a Kioton ilmastopöytäkirjaan sisällytettyjen kaasujen CO₂-ekvivalentteina arvioiduista päästöistä. Mikäli kasvihuonekaasupäästöjen oletetaan stabiloituvan vuoden 1995 tasolle, muodostavat HFC- ja PFC-yhdisteet sekä SF₆ maailmanlaajuisesti arviolta noin 2 % päästöistä vuonna 2010 ja 3 % vuonna 2020 (Harnisch et al. 2001). Taulukossa 2 vertaillaan Suomen HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöarvioita globaaleihin arvioihin perusskenaarioiden mukaisissa tilanteissa.

Taulukko 2. Suomen ja koko maailman uusien kasvihuonekaasujen päästöarviot vuosille 1996, 2010 ja 2020.

	vuoden 1996 päästöt [kt CO ₂ -ekv.]		vuoden 2010 päästöt [kt CO ₂ -ekv.]		vuoden 2020 päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	
	Suomi ¹⁾	maailma ²⁾	Suomi ¹⁾	maailma ²⁾	Suomi ¹⁾	maailma ²⁾
HFC	52	160 000	1 604	460 000	2 078	680 000
PFC	47	70 000	99	80 000	148	80 000
SF₆		60 000		60 000		120 000
yhteensä	99	290 000	1 703	605 000	2 226	873 000

¹⁾ lähde: ks. perusskenaarioiden yhteenveto (kohta 5.1)

²⁾ lähde: (Harnisch et al. 2001)

Taulukosta 2 havaitaan, että Suomen uusien kasvihuonekaasujen päästöt muodostivat vuonna 1996 noin 0,03 % globaaleista päästöistä. Osuuden ennakoita kuitenkin kasvavan noin 0,2 %:iin vuosina 2010–2020. Molemmissa tapauksissa päästöjen kasvu johtuu lähes yksinomaan HFC-päästöjen lisääntymisestä. Suomen HFC-päästöt kasvavat vuoden 1996 tasosta arviolta noin 30-kertaisiksi vuoteen 2010 mennessä, kun vastaava kasvuarvio globaaleille päästöille on vain noin 3-kertainen (taulukko 2). Suuri ero kasvuarvioissa johtuu päästöjen alhaisesta lähtötasosta Suomessa. Paljon päästöjä synnyttävien teollisuusprosessien puuttumisen vuoksi suurimmat päästölähteet Suomessa ovat olleet HFC-yhdisteitä käyttävät laitteet ja HFC-yhdisteitä sisältävät tuotteet, kuten aerosolit ja saumavaahto. Näissä laitteissa ja tuotteissa yhdisteiden merkittävä käyttö Suomessa alkoi vasta 1990-luvun puolivälin tienoilla. Suomen PFC-yhdisteiden ja rikkiheksafluoridin päästöjen arvioitua kehitystä on hankala verrata maailmanlaajuiseen tilanteeseen, sillä merkittävät päästölähteet ja niiden kehitys poikkeavat toisistaan varsin paljon.

² Montrealin sopimuksen mukaan kehitysmailla on varattu enemmän aikaa CFC-yhdisteistä ja halonien kulutuksesta luopumiselle kuin teollisuusmailla.

Taulukossa 3 vertaillaan Suomen ja Euroopan unionin jäsenvaltioiden yhteenlaskettujen uusien kasvihuonekaasujen päästölähteiden ja -määrien arvioita vuosille 1990, 1995 ja 2010.

Taulukko 3. Eriteltyjä aktuaalisia päästöarvioita Suomessa ja EU-15:ssä vuosina 1990, 1995 ja 2010.

päästölähde [Mt CO ₂ -ekv/a]	1990		1995		2010	
	Suomi ¹⁾	EU ²⁾	Suomi ¹⁾	EU ²⁾	Suomi ¹⁾	EU ²⁾
HFC-lähteet						
- HFC-23: sivutuote	-	23 600	-	26 500	-	7 200
- solumuovit: XPS	0	0	0	0	0	6 300
- solumuovit: PU	0	0	0	3 400	21	8 100
- jäähdytys ja kiinteä ilmastointi	0	0	16	1 300	1 291	18 200
- ajoneuvojen ilmastointi	0	0	2	1 200	202	17 700
- MDI + yleiset aerosolit ³⁾	0	0	3	0		9 800
- muut (HFC)	0	0	0	1 300	90	2 200
- valmistus- ja jakeluhäviöt	-	0	-	700	-	2 600
HFC yhteensä	0	23 600	22	34 500	1 604	72 200
PFC- ja SF ₆ -lähteet						
- magnesiumin valu (SF ₆)	C	1 700	C	1 500	C	2 900
- sähkölaitteet (SF ₆)	46	4 000	30	4 000	39	4 000
- muut (SF ₆)	C	5 700	C	10 500	C	10 500
- valmistus- ja jakeluhäviöt	0	1 000	0	1 200	0	1 200
- alumiinin tuotanto (PFC)	-	15 300	-	10 100	-	7 100
- puolijohdeteollisuus (PFC ⁴⁾)	C	400	C	1 900	C	15 800
- muut (PFC)	C	2 600	C	3 300	C	3 300
SF ₆ ja PFC yhteensä	47	30 700	38	32 600	99	44 900
kaikki yhteensä	47	54 000	60	67 000	1 703	117 000

XPS= suulakepuristettu polystyreeni

PU = polyuretaani

MDI = inhalaatiosumutteet

muut (HFC) = sammutuslaitteet, puolijohdeteollisuus, liuottimet, laboratoriokäyttö

muut (SF₆) = autojen renkaat, äänieristetyt ikkunat, urheilujalkineet, laboratoriokäyttö, sotilastutkat

muut (PFC) = liuottimet, kylmäaineseokset, lääketieteellinen, laboratorio- ja kosmeettinen käyttö, keinoveri

C = luottamuksellinen tieto (päästöt sisältyvät yhdisteiden ja lähteiden yhteenlaskettuun kokonaismäärään)

¹⁾ lähde: ks. perusskenaarioiden yhteenvedo (kohta 5.1)

²⁾ lähde: (Harnisch & Hendriks 2000)

³⁾ Suomen luvuissa myös saumaeristeen päästöt

⁴⁾ myös SF₆ ja HFC-23

Taulukosta 3 nähdään, että HCFC-22:n valmistuksessa sivutuotteena syntyvä HFC-23 on aiheuttanut huomattavan osan EU-maiden yhteenlasketuista päästöistä. Nämä päästöt ovat pienentymässä vähennysteknologioiden käyttöönoton myötä ja ovat vuonna 2010 arviolta noin 7,2 Mt CO₂-ekvivalenttia, joka vastaa noin 10 %:a kaikista EU-maiden HFC-päästöistä (taulukko 3). Suomessa HCFC-22:n tuotantoa ei ole ja siksi Suomen uusien kasvihuonekaasujen päästörakenne ja ajallinen käyttäytyminen poikkeaa EU-maiden yleisestä tilanteesta³. Muut HFC-päästöt (pääasiassa jäähdytyksen ja ilmastoinnin kylmäainepäästöt) näyttäisivät näiden arvioiden perusteella kasvavan Suomessa verrattain nopeammin kuin yleisesti EU-maissa (taulukko 3). Sen sijaan

³ HCFC-22:n tuottajamaita EU:ssa ovat Ranska, Saksa, Kreikka, Italia, Alankomaat, Espanja ja Iso-Britannia (Harnisch & Hendriks 2000).

Suomen ja EU-maiden keskinäiset PFC-yhdisteiden ja rikkiheksafluoridin päästöjen suhteet näyttäisivät pysyvän likimain ennallaan välillä 1990–2010, vaikka päästösektoreissa on huomattavia eroja. Alumiinin primäärituotannossa syntyvät PFC-yhdisteet (CF₄ ja C₂F₆) sekä autonrenkaiden ja äänieristettyjen ikkunalasien täyttäminen SF₆:lla (muut SF₆) muodostavat valtaosan EU-maiden PFC- ja SF₆-päästöistä, tosin puolijohdeteollisuuden osuus on kasvamassa merkittävästi (taulukko 3). Alumiinin primäärituotantoa⁴ ei ole Suomessa ja lisäksi muut SF₆-päästöt ovat merkityksettömän vähäisiä. HFC- ja PFC-yhdisteitä sekä SF₆:ta ei myöskään valmisteta Suomessa ja jakeluhäviöt on arvioitu merkityksettömiksi.

Suomessa uusien kasvihuonekaasupäästöjen ennakoitu kasvu johtuu lähes yksinomaan HFC-yhdisteiden kylmäainekäytön lisääntymisestä. EU-maissa kylmäainepäästöt muodostavat vuonna 2010 arviolta noin 30 % uusien kasvihuonekaasujen päästöistä, kun vastaava luku Suomessa on noin 90 % (taulukko 3). Tästä syystä myös päästöjen vähennystarve poikkeaa Suomessa yleisestä EU-maiden tilanteesta, jossa päästöt aiheutuvat tasaisemmin useasta eri sektorista (taulukko 3).

⁴ Alumiinin primäärituottajia EU:ssa ovat Saksa, Ranska, Italia, Alankomaat, Espanja, Ruotsi, Kreikka, Iso-Britannia ja Itävalta (Harnisch & Hendriks 2000).

3. Päästöjen ja kustannusten arvioinnin metodologia

3.1 Eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutusten vertailu

Kasvihuonekaasut absorboivat maapallon lähettämää pitkäaaltoista lämpösäteilyä ja aiheuttavat siten positiivista säteilypakotetta. Osa kaasuista aiheuttaa lisäksi negatiivista pakotetta (esimerkiksi yläilmakehän otsonin tuhoamisominaisuuksilla), jolloin on arvioitava pakotteiden nettovaikutus. HFC- ja PFC-yhdisteet sekä rikkiheksafluoridi eivät tuhoa yläilmakehän otsonia.

Kasvihuonekaasun säteilypakote riippuu molekyylin spektroskooppisten ominaisuuksien lisäksi kaasun eliniästä ja pitoisuudesta ilmakehässä. Suhteuttamalla tietyn kaasun säteilypakote jonkin toisen kaasun vastaavaan arvoon voidaan vertailla kaasujen kasvihuonekaasuvaikutusta Käytettäessä vertailukaasuna hiilidioksidia saadaan GWP⁵-indeksiksi kutsuttu suhdeluku, joka määrittellään seuraavasti:

$$GWP_{j,t_f} = \frac{\int_0^{t_f} \alpha_j c_j(t) dt}{\int_0^{t_f} \alpha_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}, \quad (1)$$

missä α_j on säteilypakotteen välitön kasvu, joka johtuu kaasun j yhden yksikön konsentraatiomuutoksesta,
 $c_j(t)$ on yksikköpäästöstä johtuva konsentraation muutos ajanhetkellä t ja
 t_f on valittu tarkastelujakso.

Kioton pöytäkirjassa tarkasteluajanjaksona on sovittu käytettävän sataa vuotta. On kuitenkin syytä huomata, että mitä pidempää tarkastelujaksoa käytetään, sitä suurempi on ilmakehässä pitkään pysyvien kaasujen GWP-arvo. HFC-yhdisteiden keskimääräinen elinikä ilmakehässä vaihtelee muutamasta vuodesta satoihin vuosiin, PFC-yhdisteiden tuhansista kymmeneen tuhansiin vuosiin (liite A). Rikkiheksafluoridi pysyy ilmakehässä keskimäärin 3 200 vuotta (liite A).

Tässä työssä käytetään hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) vuonna 1996 julkaisemia GWP₁₀₀-kertoimia (IPCC 1996), jotka on esitetty liitteessä A.

⁵ GWP = Global Warming Potential

3.2 Päästöjen arviointi ja skenaarioiden laatiminen

Tässä työssä laadittiin kuvauksia päästöjen kehittymisestä ajassa eli skenaarioita. Päästöjen kehittymistä arvioitiin kahdessa erityyppisessä skenaariossa, joissa päästöjen kehittymiseen vaikuttavat tekijät poikkeavat toisistaan. Perusskenaarioiden huomioitavat tekijät kuvataan kohdassa 3.2.1 ja päästövähenysskenaarioiden kohdassa 3.2.2. Jokainen skenaario laadittiin samalla periaatteella, jossa päästö tietylle vuodelle lasketaan kertomalla toiminnan määrää kuvaava aktiviteettiluku päästökertoimella

$$P_{ijt} = A_{ijt} f_{ijt}, \quad (2)$$

missä P_{ijt} on toiminnan i aiheuttama kaasun j päästö vuonna t ,
 A_{ijt} toiminnan i , johon liittyy kaasun j käyttö, määrää vuonna t kuvaava aktiviteettiluku ja
 f_{ijt} päästökerroin (samoin alaindeksein varustettuna).

Kaavan (2) oletus päästöjen suorasta verrannollisuudesta toiminnan määrään sisältyy jokaiseen tässä raportissa esitettyyn skenaarioon.

Kunkin sektorin (toiminnan i : joukko laitteita, tuotteita tai prosesseja) päästöskenaario laskettiin yksittäisten päästölähteiden elinkaaren eri vaiheissa syntyvien päästöjen summana. Päästöjä aiheuttavan lähteen (laitteen, tuotteen, prosessin) elinkaaren vaiheet jaettiin tätä varten kolmeen osaan: (i) valmistus tai asennus, (ii) käyttö ja (iii) poistaminen käytöstä. Joidenkin sektoreiden kohdalla tietty vaihe jätettiin huomiotta esimerkiksi sen vuoksi, että päästölähteitä ei valmisteta Suomessa.

Kaikkien sektorien i ja kaasujen j kokonaispäästö $P_{kok,t}$ kullekin vuodelle laskettiin kaavasta

$$P_{kok,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{a,ijt} + P_{k,ijt} + P_{p,ijt}, \quad (3)$$

missä $P_{a,ijt}$ on laitteen tai tuotteen valmistus- tai asennusvaiheessa syntyvä päästö,
 $P_{k,ijt}$ laitteen tai tuotteen käytön aikana syntyvä päästö ja
 $P_{p,ijt}$ laitteen tai tuotteen käytöstä poistosta aiheutuva päästö.

Käyttäen kaavan (3) esitystapaa on kokonaispäästö siten

$$P_{kok,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{a,ijt} f_{a,ijt} + A_{k,ijt} f_{k,ijt} + A_{p,ijt} f_{p,ijt}. \quad (4)$$

Termien $A_{a,ijt}$, $A_{k,ijt}$ ja $A_{p,ijt}$ määrittely poikkesi erityyppisten lähteiden kohdalla hieman toisistaan. Myös käytettävissä olleet lähtötiedot vaikuttivat siihen, kuinka päästö tietyllä sektorilla mallinnettiin. Laitteiden tai laitosten (kylmä- ja ilmastointilaitteiden, sähkölaitteiden) tapauksessa

$A_{a,ijt}$ on sektorin i laitteisiin (tai laitoksiin) valmistuksen (asennuksen) yhteydessä täytetyn kaasun j määrää vuonna t ,
 $A_{k,ijt}$ sektorin i laitteissa tai laitoksissa varastoituneena olevan kaasun j määrä vuonna t ja
 $A_{p,ijt}$ sektorin i laitteista tai laitoksista i poistetun kaasun j määrä vuonna t .

Laitteissa varastoituneena olevan kaasun määrä $A_{k,ijt}$ laskettiin kullekin vuodelle t kyseisen vuoden ja sitä edeltäneiden vuosien aikana käyttöön otetun ja käytöstä poistetun kaasumäärän summien erotuksena

$$A_{k,ijt} = \sum_{t=0}^n A_{a,ijt} - \sum_{t=0}^n A_{p,ijt} \quad (5)$$

Kylmä- ja ilmastointilaiteskenaarioissa vuosi $t = 0$ kiinnitettiin joko vuoteen 1993, 1994 tai 1995 riippuen HFC-yhdisteiden käyttöön oton alkamisajankohdasta kyseisellä sektorilla.

Määrän $A_{p,ijt}$ määrittämiseksi tarvittiin jokaisessa skenaariossa laite- tai laitostyyppin käyttöikä koskeva oletus. Käyttöikä koskevan oletuksen avulla saatiin käytöstä kunakin vuonna poistettu kylmäainemäärä seuraavasti:

$$A_{p,ijt} = A_{a,ijt-l} \quad (6)$$

missä l on laitteen tai laitoksen käyttöikä.

Aktiviteettitermit koostuivat laitteiden tai laitosten lukumääristä ja keskimääräisistä täytöksistä:

$$A_{a,ijt} = N_{a,ijt} c_{ijt} \quad (7)$$

$$A_{k,ijt} = N_{k,ijt} c_{ijt} = \sum_{t=0}^n N_{a,ijt} c_{ijt} - \sum_{t=0}^n N_{p,ijt} c_{ijt} = \sum_{t=0}^n N_{a,ijt} c_{ijt} - \sum_{t=0}^n N_{a,ijt-l} c_{ijt} \quad (8)$$

$$A_{p,ijt} = N_{p,ijt} c_{ijt} \quad (9)$$

Kaavoissa (7), (8) ja (9)

N_a on valmistettujen laitteiden tai asennettujen laitosten lukumäärä,
 N_k käytössä olevien laitteiden tai laitosten lukumäärä,
 N_p käytöstä poistettujen laitteiden tai laitosten lukumäärä ja
 c_{ijt} laitteiden tai laitosten keskimääräinen kaasutäytös.

Usean skenaarion (kaupan kylmälaitokset, ilmaston jähdytys, teollisuusjäähdytys, kylmäkuljetukset, suurkeittiöt) lähtötietojen luonteen (ks. kohta 3.2.3) vuoksi muutosta päästöjä aiheuttavan toiminnan määrässä (esim. asennetun kylmäaineen määrässä) kuvattiin seuraavasti:

$$A_{a,ijt} = N_{a,ijt-1}c_{ijt-1} + p_{a,i}N_{a,ijt-1}c_{ijt-1}, \quad (10)$$

missä $p_{a,i}$ on toiminnan määrässä tapahtuva vuotuinen suhteellinen kasvu tai vähenemä.

Sijoittamalla (10) kaavaan (7) ja sen jälkeen (7), (8) ja (9) kaavaan (4) saadaan kokonaispäästö $P_{kok,t}$ kullekin vuodelle t :

$$P_{kok,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(N_{a,ijt-1}c_{ijt-1} + p_{a,i}N_{a,ijt-1}c_{ijt-1} \right) f_{a,ijt} + \left(\sum_{i=0}^n N_{a,ijt}c_{ijt} - \sum_{i=0}^n N_{a,ijt-1}c_{ijt} \right) f_{k,ijt} \right] + N_{p,ijt}c_{p,ijt}f_{p,ijt}. \quad (11)$$

3.2.1 Perusskenaarioiden päästöjen mallintaminen

Perusskenaarioissa pohditaan päästöihin vaikuttavien tekijöiden avulla päästöjen kehityksen suuntaa ja määrää tulevaisuudessa. Näitä tekijöitä ovat muun muassa näköpiirissä oleva toiminnan volyyymi ja sen muutokset, teknologian muuttuminen sekä voimassa oleva lainsäädäntö ja sen muutokset.

Tietyn tyyppinen teknologian muuttuminen, kuten kylmäainetäytöksen pieneneminen kehityksen seurauksena joissakin ilmastointilaitesovelluksissa, vaikuttaa suoraan päästömääriin. Vaikutus on suoraa seurausta mallinnuksessa valitusta lähestymistavasta, jossa päästö on suoraan verrannollinen aktiviteetin määrään (vrt. kaavat (2), (7), (8) ja (9)).

Myös lainsäädännön ja sen muuttumisen vaikutus päästöjen kehittymiseen sisällytettiin laadittuihin skenaarioihin. Kaikissa kylmälaitteita ja laitoksia käsittelevissä skenaarioissa on esimerkiksi oletettu, että kylmäaine otetaan talteen, kun laite tai laitos poistetaan käytöstä (talteenotto vähentää käytöstäpoistosta aiheutuvia päästöjä 75–85 % skenaariosta ja arvioidusta hyötysuhteesta riippuen). Nykyinen EU-lainsäädäntö

(2037/2000) ja Suomen kansallinen lainsäädäntö (VNp 262/1998) koskevat kylmäaineiden osalta ainoastaan CFC- ja HCFC-yhdisteitä. Vastaava HFC- ja PFC-yhdisteitä koskeva lainsäädäntö (tai jokin muu ohjauskeino) nähtiin kuitenkin luonnollisena jatkeena nyt voimassa olevalle lainsäädännölle.

Uusien kasvihuonekaasujen päästöihin kiinnitetään jatkuvasti yhä enemmän huomiota. Eri aloilla tapahtuvat teknologiset kehitykset ja ohjauskeinojen nopeat muutokset (esimerkiksi lainsäädännön tiukkeneminen) ovat jo vähentäneet ja vähentävät todennäköisesti myös tulevaisuudessa päästöjä merkittävästi. Näiden vaikutusten arvioiminen ja ennakoiminen on hyvin hankalaa, ja siten myös perusskenaarion laatiminen on useassa tapauksessa ongelmallista.

Teknologista ja lainsäädännön muutosta koskevat oletukset – mikäli tällaisia tehtiin – on kuvattu kunkin yksittäisen päästösektorin kohdalla tarkemmin.

3.2.2 Päästövähennysskenaarioiden päästöjen mallintaminen

Päästövähennysskenaarioiden avulla pyritään arvioimaan, kuinka paljon tiettyjä teknisiä toimia käyttöönottamalla voitaisiin vähentää jonkin tietyn sektorin päästöjä kyseiseen perusskenaarioon verrattuna. Toimien käyttöönottamisen ei oletettu muuttavan toiminnan volyyymiä. Lainsäädäntöä koskevien oletusten arvioitiin olevan yhtäläisiä perusskenaarioiden mukaisten tilanteiden kanssa. Teknisistä päästövähennystoimista aiheutuu yleensä kustannuksia tai muita vaikutuksia, joiden takia niiden käyttöönoton toteutuminen on tällä hetkellä epävarmaa.

Vähennysskenaarioita laadittiin erityyppisille teknisille toimille. Näistä tärkeimpiä ovat päästöjä aiheuttavien yhdisteiden vuotojen vähentäminen sekä yhdisteiden käyttöä vähentävän tai kokonaan poistavan vaihtoehtoisen tekniikan ja aineiden käyttöönotto. Vuotojen vähentämisellä tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla voidaan vähentää järjestelmiin (laitteisiin, tuotteisiin tai prosessiin) sisältyvien yhdisteiden päästöjä niiden elinkaaren tietyssä tai jokaisessa vaiheessa (esimerkiksi ottamalla kaasu talteen laitteen huollon ja käytöstäpoiston yhteydessä tai päästöjä aiheuttavien prosessien aikana). Vuotoja voidaan vähentää myös tiivistämällä yhdisteitä sisältäviä laitteita, esimerkiksi parempien teknisten ratkaisujen seurauksena. Vaihtoehtoisten tekniikoiden käyttäminen päästövähennyskeinona tarkoittaa menetelmää, jossa halogenoituja yhdisteitä tavanomaisesti käyttävien järjestelmien teknologiaa muutetaan siten, että yhdisteiden kulutus pienenee tai loppuu kokonaan ilman, että järjestelmällä suoritettavaa toimintoa (jäähdytystä, puhdistusta, etsausta yms.) muutetaan. Halogenoituille yhdisteille vaihtoehtoisten aineiden käyttäminen päästövähennyskeinona puolestaan tarkoittaa toiminnon suorittamista kasvihuoneilmiön kannalta vähemmän haitallisilla tai

haitattomilla yhdisteillä. Menetelmä saattaa vaatia myös vaihtoehtoisen tekniikan käyttämistä. Joissakin tapauksissa päästövähennyskeinoksi on mahdollista valita joko vaihtoehtoinen tekniikka, aine tai molemmat yhdessä.

Vuotojen vähentämiseen perustuvissa skenaarioissa päästöt laskettiin samalla tavalla kuin perusskenaarioiden kohdalla. Päästöjen pieneneminen saatiin aikaan muuttamalla päästökertoimia vähennystoimenpiteen käyttöönottovuodesta alkaen. Skenaarioissa eroteltiin ennen toimenpiteen käyttöönottovuotta asennetut laitteet (vanhat laitteet) ja käyttöönottovuoden aikana ja sen jälkeen asennetut laitteet (uudet laitteet). Näin voitiin mallintaa parantuneiden huoltokäytäntöjen lisäksi uuden laitekannan teknologisia muutoksilla saavutettavaa parantunutta tiivyyttä. Kunkin skenaarion yksityiskohtaiset oletukset on taulukoitu vähennysskenaarion kuvauksen yhteyteen.

Vähennysskenaarioissa, jotka perustuivat joko vaihtoehtoiselle tekniikalle tai halogenoiduille yhdisteille vaihtoehtoisten aineiden käyttöön, mallinnettiin päästöjen väheneminen soveltamalla yllä kuvattua laskentamenetelmää ainoastaan ennen toimenpiteen käyttöönottovuotta asennettuun laitekantaan. Samalle päästölähteelle on monissa tapauksissa mahdollista esittää sekä vuotojen vähentämiseen että vaihtoehtoiseen tekniikkaan tai aineeseen perustuva vähennysskenaario. Näin onkin tehty tärkeimpien päästölähteiden kohdalla kuitenkin siten, että skenaariot laadittiin erikseen kummankintyyppiselle vähennyskeinolle, jotta eri menetelmillä saavutettavat päästövähennykset ja kustannustehokkuudet tulisivat selvemmin esille. Työssä ei siis esitetä vähennysskenaarioita, joissa laitekantaan kohdistettaisiin samanaikaisesti sekä vuotojen vähentämiseen tähtääviä toimenpiteitä että vaihtoehtoisten tekniikoiden tai aineiden käyttöönottoa. Lisäksi on huomattava, että vaihtoehtoiseen tekniikkaan tai aineisiin perustuvat toimenpiteet on laskelmissa kohdistettu uusiin laitteisiin. Työssä ei siis myöskään ehdoteta kyseisiä toimenpiteitä (investointeja) kohdistettaviksi sellaisiin laitteisiin, joilla on käyttöikä vielä jäljellä vähennyskeinon käyttöönottovuonna.

Halogenoiduille yhdisteille vaihtoehtoisten aineiden (CO₂, hiilivedyt) ilmastoa lämmittävä vaikutus jätettiin skenaarioissa merkityksettömänä huomiotta⁶. Sen sijaan vaihtoehtoisten tekniikoiden ja aineiden käytöstä aiheutuva energiankulusta mahdollisesti lisäävä vaikutus⁷ otettiin huomioon mallintamalla vähennysskenaarioon myös energiantuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasujen päästöt (siltä osin kuin niiden arvioitiin kasvavan perusskenaarion referenssijärjestelmään verrattuna). Tarkasteltavien

⁶ Esimerkiksi autojen ilmastointilaitteille esitetään hiilidioksidin kylmäainekäyttöön perustuva vähennysskenaario. Tässä skenaariossa kylmäainehiilidioksidin suorat päästöt on jätetty huomiotta, koska hiilidioksidin GWP on hyvin pieni perusskenaarion kylmäaineen HFC-134a:n GWP-arvoon verrattuna (1/1 300).

⁷ Järjestelmän energiankulutus saattaa lisääntyä, mikäli muutokset alentavat suorituskykyä, jolla järjestelmä tuottaa tietyn toiminnon (esim. jäädytys).

järjestelmien käyttöenergia on oletettu olevan ostosähköä. Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen suuruus riippuu paljolti menetelmästä, jolla sähkö on tuotettu. Koska tarkastelu suoritetaan valtakunnan tasolla, on sähköntuotannolle käytetty keskimääräistä päästökerrointa 250 g CO₂/kWh (Lehtilä et al. 1997). Energiankulutukseen liittyvät oletukset on kuvattu niiden yksittäisten vähennysskenaarioiden kohdalla, joissa tällaisia vaikutuksia ennakoidaan.

3.2.3 Skenaarioiden lähtötiedot

Useiden skenaarioiden laadinnan pohjana hyödynnettiin Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön käyttöön vuonna 2000 kerättyä kyselyaineistoa (SYKE 2000a, b, c, d ja e). Kylmä- ja ilmastointilaitteita sekä lämpöpumppuja koskeva aineisto koostuu vuonna 1999 käyttöön otettujen laitteiden ja -laitosten lukumääristä sekä kylmäaineiden kokonaismääristä. Kysely oli toimitettu Suomen Kylmäliikkeiden Liiton jäsenyrityksille sekä tiedossa olleille muille alan yrityksille. Lisäksi hyödynnettiin vastaaventyypisiä autojen maahantuojille (maahantuodut ilmastointilaitteet henkilö-, paketti-, kuorma- ja linja-autoissa) ja sähköyhtiöille tehtyjä kyselyjä (käyttöön otettujen SF₆-eristeisten sähkölaitteiden lukumäärät ja kaasusisältö). Myös aerosolien maahantuojille ja valmistajille sekä kemikaalien maahantuojille tehtyjä kyselyjä on käytetty skenaarioiden laadinnassa.

Päästökertoimien kohdalla arviot perustuvat kirjallisuudessa esitettyihin tietoihin. Pääasiallisena lähteenä käytettiin hallitusten välisen ilmastopaneelin (IPCC) arvioita (IPCC 2000), jotka perustuvat asiantuntijoiden arvioihin esimerkiksi valmistuksen yhteydessä syntyvistä päästöistä ja laitteiden käytönaikaisista vuodoista. Asiantuntija-arvioihin jouduttiin tyytymään, koska tutkittua tietoa päästökertoimista on hyvin vähän, jos ollenkaan. Parhaatkin arviot ovat yleensä suuntaa-antavia, joten päästökertoimiin liittyy varsin suuria epävarmuuksia.

Skenaarioissa esiintyvät laitteiden keskimääräiset käyttöiät ovat niin ikään oletuksia, joiden lähteenä käytettiin pääasiassa edellä mainittua dokumenttia. Myös käyttöikää koskeviin oletuksiin pätee sama epävarmuutta koskeva huomautus.

3.3 Päästövähennystoimet ja kustannusten arviointi

3.3.1 Päästövähennystoimien valinta

Tässä työssä pyrittiin löytämään ja kartoittamaan sellaisia teknisiä päästövähennystoimia, joilla on tai voisi olla pitkäaikaista nettovaikutusta kasvihuonekaasupäästöjen

vähentämiseen. Pitkäaikaisella nettovaikutuksella tarkoitetaan tässä työssä toimea, jonka sovellettavuusaika kattaa mielellään varsinaisen sovelluskohteen (päästölähteen) teknisen käyttöään.

Päästövähennystoimenpiteiden teknologinen kypsyys vaikuttaa toimien potentiaaliseen käyttöönottoaikatauluun. Teknisesti kypsät toimet sisältävät usein vähemmän epävarmuutta, muun muassa sovellettavuuden ja saavutettavissa olevan päästövähennyksen osalta, kuin tulevaisuudessa mahdollisesti kaupallistuvat tekniikat. Joidenkin päästövähennystoimenpiteiden sovellettavuus saattaa olla niin alhainen, että merkitys päästösektorin tai kokonaisuuden kannalta jää hyvin vähäiseksi.

Lähtökohtana on uusien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, mutta joissain tapauksissa päästövähennystoimenpiteiden käyttöönotto saattaa kuitenkin nostaa muiden kasvihuonekaasujen päästöjä (esimerkiksi lisääntyneen energiankulutuksen kautta) ja alentaa siten toimenpiteen tehokkuutta ilmaston muutosta torjuttaessa. Tällaisissa tapauksissa pyritään arvioimaan toimilla saavutettava nettovaikutus kokonaiskasvihuonekaasupäästöissä. Useiden päästösektoreiden erilaiset sovellukset poikkeavat kuitenkin toisistaan siinä määrin, ettei yksityiskohtaisia vastauksia tietyllä toimenpiteellä saavutettavissa olevaan päästövähennykseen voida esittää. Tästä syystä päästövähennystoimien vaikutukset pyritään analysoimaan varsin yleisellä tasolla ja alan asiantuntijoiden arvioita hyväksi käyttäen.

Päästövähennystoimenpiteet aiheuttavat usein myös kustannuksia niiden käyttöönottajille esimerkiksi investointien tai lisääntyneiden huoltokustannusten muodossa. On tosin myös mahdollista, että käyttöönottaja hyötyy toimista taloudellisesti, esimerkiksi yhdisteiden pienemmän kulutuksen seurauksena. Tässä työssä päästövähennystoimien kustannukset arvioidaan marginaalisina nettokustannuksina toimenpiteiden käyttöönottajien kannalta. Toimen käyttöönotosta aiheutuvan mahdollisen lisääntyvän sähkönkulutuksen kustannukset on arvioitu käyttämällä sähkön hintana pienteollisuudelle (KTM 2000) valittua vakiotariffia 40 p/kWh. Kustannuslaskelmissa ei ole tarkoitus löytää toimien lopullista maksajaa tai arvioida toimien vaikutuksia esimerkiksi käyttöönottajien markkina-asemaan ja sitä kautta liiketoiminnan kannattavuuteen. Näitä asioita pohditaan kvalitatiivisesti luvussa 6. Päästövähennystoimenpiteiden kustannusarviot perustuvat toimilla saavutettavissa olevan päästövähennyspotentiaalın tavoin alan asiantuntijoiden arvioihin ja niihin saattaa sisältyä huomattavia epävarmuuksia yksittäisiä sovelluksia ajatellen.

Uusien kasvihuonekaasujen päästövähennyskustannuksia arvioivia julkaisuja on toistaiseksi olemassa hyvin vähän. Tähän harvalukaiseen joukkoon kuuluvat esimerkiksi March (1998), Little (1999), EPA (2000) ja Harnisch & Hendriks (2000). Useimmissa lähteissä kustannukset on esitetty ainoastaan saavutettavaa päästö-

vähentämää kohden (esim. mk/t CO₂-ekv.). Tällaisten arvioiden soveltaminen aktiiviteettidataan on erittäin hankalaa tai mahdotonta. Edellä mainituista lähteistä Harnisch & Hendriks (2000) ovat eritelleet kustannusarvionsa parhaiten yksittäisiä päästövähennystoimia kohden, joten niitä käytettiin tämän selvityksen kustannusarvioiden pääasiallisena pohjatietona.

Päästövähennysskenaarioihin ja -laskelmiin valitaan toimet, joiden teknologinen kypsyys ja sovellettavuus arvioidaan riittäväksi tällä hetkellä tai lähitulevaisuudessa. Joidenkin työssä esitettyjen toimien kohdalla saatu tiedon määrä ei ole ollut riittävä, jotta toimien vaikutuksia päästöihin olisi voitu arvioida kvantitatiivisesti. Tässä työssä yhdelle päästösektorille tai -prosessille valitaan yksi tai muutama toimi, jotka esitetään tilanteen mukaan rinnakkaisina tai erillisinä. Päästövähennystoimien käyttöönotto-aikataulu pyritään laatimaan realistiseksi huomioimalla valittujen toimien teknologinen kypsyys.

Kustannuslaskelmien tarkoituksena on tuottaa tietoa eri päästövähennystoimien kustannustehokkuuksista. Laskelmilla ei pyritä optimoimaan tietyn toimen kustannusminimiä ja vastaavasti päästövähennysmaksimia eri tarkastelukausia varten. Lähtökohdaksi onkin ilmaston muutoksen ehkäiseminen, ja siksi kaupallisella tasolla olevat toimet arvioidaan otettavan käyttöön mahdollisimman nopeasti, pääsääntöisesti vuoden 2002 alusta alkaen.

3.3.2 Päästövähennyskustannusten laskenta

Työssä esitetyt kustannukset ilmoitetaan vuoden 1999 Suomen markkoina ja vähennetty päästö hiilidioksidiekvivalenteiksi muutettuna massana. Päästövähennyskustannukset ilmoitetaan yksikkönä mk/t CO₂-ekvivalenttia. Nykyhetkeksi oletetaan vuoden 2000 puoliväli, ja kaikkien kustannusten oletetaan tapahtuvan aina kulloisenkin vuoden puolivälissä. Reaalikorkokantana käytetään 4 %:n laskentakorkoa. Tulevaisuudessa esiintyvät kustannukset muutetaan nykyhetkeä vastaavaksi nykyarvoksi kaavalla

$$\text{Nykyarvo} = \frac{k_n}{(1+d)^n}, \quad (12)$$

missä k_n on vuonna n aiheutuva kustannus,
 d laskentakorko ja
 n kustannuksen esiintymisajankohdan ja nykyhetken välinen aikaero vuosina.

Päästövähennyskustannuksia tarkastellaan sekä Kioton ensimmäisen velvoitekauden (2008–2012) että vuoden 2020 tasossa. Kioton ensimmäisestä velvoitekaudesta käytetään

tässä työssä nimitystä KIOTO 1. Kaikkien tietyn päästövähennystoimen aiheuttamien kustannusten nykyarvojen summa lasketaan tarkastelukauden loppuun (2012 tai 2020) asti. Vertaamalla summaa toimen käyttöönottohetkestä tarkastelukauden loppuun mennessä saavutettavaan päästöväheneeseen tai -tasoon voidaan havaita, kuinka paljon kustannuksia saavutettava päästötaso tai -vähenemä kokonaisuudessaan vaatii.

Varsinaiset päästövähennyskustannukset lasketaan vertailemalla tietyn toimen tarkasteluvuoden kustannuksia vastaavana vuotena saavutettavaan päästöväheneeseen. Investointikustannukset jaetaan vuosittaisiksi kustannuksiksi koko päästövähennystoimen arvioidulle käyttöiälle kertomalla ne annuiteettitekijällä

$$\text{annuiteetti} = \frac{d}{(1 - (1 + d)^{-t})}, \quad (13)$$

missä d on laskentakorko ja
 t toimen käyttöikä vuosina.

Laskentamenetelmä arvioi päästövähennystoimien pitkän ajan soveltuvuutta ilmaston lämpenemisen ehkäisemisessä. Menetelmä huomioi ajanjakson pituuden, jolla tehtävällä investoinnilla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä. Vuonna n käyttöönotettava päästövähennystoimi, jonka käyttöikä on t vuotta, aiheuttaa vuotuisiksi kustannuksiksi muutettuja investointeja vuodesta n vuoteen $(n + t - 1)$. Vuonna $(n - 1)$ tehdyn vastaavan päästövähennystoimen kustannukset eivät siten sisälly vuonna $(n + t)$ tehtävään tarkasteluun, sillä kyseinen toimi ei myöskään vaikuta millään tavalla⁸ vuonna $(n + t)$ saavutettavaan päästöväheneeseen. Näin laskettuihin investointikustannuksiin (I) lisätään tarkasteluvuonna aiheutuvat käyttö- ja huoltokustannukset ($K \& H$) ja summa jaetaan tarkasteluvuonna saavutettavalla CO₂-ekvivalentilla päästöväheneemällä (PV), jolloin päästövähennyskustannukset (PVK) ovat (Willis 1999):

$$PVK = \frac{I + K \& H}{PV} \quad (14)$$

KIOTO 1 -tason tarkastelussa käytetään kaikille kaavassa (14) esiintyvillä parametreille keskimääräistä arvoa vuosilta 2008–2012.

⁸ Toimien käytön ei oleteta vaikuttavan esimerkiksi teknologiseen kehitykseen tai markkinoihin.

4. Päästösektorien tarkastelu

4.1 Kylmä- ja ilmastointilaitteet sekä lämpöpumput

4.1.1 Yleistä

Kylmä- ja ilmastointilaitteiden sekä lämpöpumppujen kylmäaineet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 arviolta noin 230 kt CO₂-ekvivalenttia uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 68 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,3 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

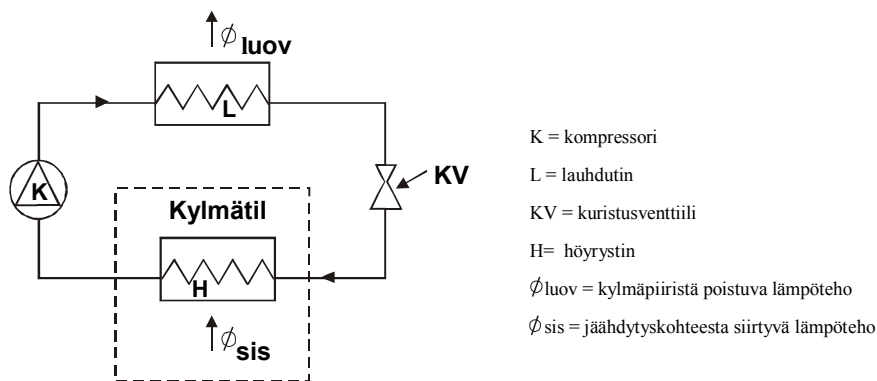
1900-luvun alussa erilaisten kylmälaitteiden kylmäaineena käytettiin pääasiassa hiilidioksidia (CO₂), ammoniakkaa (NH₃), rikkidioksidia (SO₂) ja metyylikloridia (CH₃Cl). Näiden aineiden haittapuolena on kuitenkin myrkyllisyys tai syttyvyys, joten 1930-luvulla niitä ruvettiin korvaamaan myrkyttömällä ja palamattomilla CFC-yhdisteillä. CFC-yhdisteiden käyttö laajeni huomattavasti 1960- ja 1970-luvuilla ja ainoastaan ammoniakki säilytti asemaansa niiden rinnalla hyvien lämpötaloudellisten ominaisuuksiensa ansiosta. Teollisissa jäähdytyssovelluksissa ammoniakki on yksi vanhimmista kylmäaineista, ja sillä on edelleen merkittävä markkinaosuus monissa valtioissa (van Gerwen 2000). 1990-luvun alussa otsonia tuhoavia CFC-yhdisteitä korvaamaan tulivat yläilmakehän otsonin tuhoutumisen kannalta vähemmän haitallisista HCFC- ja haitattomista HFC-yhdisteistä koostuvat kylmäaineet. HCFC-22 oli tosin kehitetty jo 1900-luvun alkupuolella ja ollut käytössä useita vuosikymmeniä. Osa CFC-yhdisteiden kulutuksesta on korvattu kokonaan erityyppisillä kylmäaineilla ja tekniikoilla sekä erilaisilla talteenotto- ja kierrätysjärjestelmillä, kuten myös huolto- ja kunnossapitotoimintojen tehostamisella. HFC-yhdisteet korvaavat myös kylmälaitteiden HCFC-yhdisteitä ja siksi niiden käyttö kasvaa tällä hetkellä jatkuvasti.

Kylmä- ja ilmastointilaitteiden sekä lämpöpumppujen muodostamaan sektoriin sisältyy lukuisia erilaisia sovelluskohteita ja sovelluksia, jotka vaihtelevat pienistä yksittäisistä laitteista aina suuriin laitoksiin saakka. Tässä työssä sektori jaetaan kotitalouksien kylmälaitteisiin (kohta 4.1.5), erilaisiin kaupallisiin ja teollisiin kylmäjärjestelmiin (kohdat 4.1.6–4.1.10) sekä erityyppisiin ilmastointilaitteisiin (kohdat 4.1.11 ja 4.1.12) ja lämpöpumppuihin (kohta 4.1.13). Uusien kasvihuonekaasujen päästöjä aiheuttavia yhdisteitä käytetään kylmähöyryprosesseissa, jotka muodostavat valtaosan maailman kylmätekniikasta.

4.1.2 Kylmähöyryprosessit

Yleisimmät käytössä olevat jäähdytyslaitteet ovat kompressorikoneita, jotka paineistavat kylmäainetta sähkö- tai polttomoottorin avulla. Laitteiden toiminta perustuu niin sanottuun käänteiseen Clausius-Rankine-prosessiin, jota on todellisissa kylmähöyryprosesseissa käytännöllisistä syistä modifioitu esimerkiksi höyryn tulistuksella, nesteen alijäähtyksellä ja kuristusventtiilin käytöllä (Wiksten 1996).

Kylmähöyryprosessissa höyrystynyt kylmäaine paineistetaan kompressorissa ja johdetaan lämmönsiirtimeen (lauhdutin), jossa sitä jäähdytetään ilmalla, vedellä tai vesiliuoksella riippuen lauhtuttimen tyypistä (esim. Aittomäki et al. 1992). Lauhtuneen kylmäaineen annetaan tyypillisesti alijäähtyä⁹ joko lauhtuttimessa tai erillisessä lämmönvaihtimessa ilman, veden, vesiliuoksen tai sisäisen lämmönvaihdon (höyrystimestä tulevan kylmän höyryn) avulla (Aittomäki et al. 1992). Kylmäaineen annetaan paisua kuristusventtiilissä tai kapillaariputkessa, jolloin kylmäaine jäähtyy edelleen ja osa siitä saattaa höyrystyä. Tämän jälkeen kylmäaine johdetaan lämmönsiirtimeen (höyrystin), jossa sitä lämmitetään ilmalla, vedellä, kylmäliuoksella tai -seoksella (brines). Kompressoriiin imettävän höyrystyneen kylmäaineen annetaan yleensä ensin tulistua¹⁰ sopivasti höyrystimessä ja imuputkessa, jotta vältetään muun muassa kostean höyryn kompressorissa aiheuttamilta nesteiskuilta (Aittomäki et al. 1992).



Kuva 1. Kylmähöyryprosessin suoran jäähdytyksen periaate.

Kylmähöyryprosessin suorassa jäähdytyskytkennässä höyrystin sijaitsee suoraan jäähdytettävässä kohteessa, josta siirtyy lämpöä höyrystyvään kylmäaineeseen (kuva 1). Jäähdytyksen epäsuorassa (välillisessä) kytkennässä (kuva 2) on varsinaisen

⁹ Neste on alijäähtynyt, kun sen lämpötila on matalampi kuin vallitsevaa painetta vastaava kyllästyslämpötila (Aittomäki et al. 1992).

¹⁰ Höyry on tulistunut, kun sen lämpötila on korkeampi kuin vallitsevaa painetta vastaava kyllästyslämpötila. Tulistus lisää kompressorin tarvitsemää tehoa, joten tulistuksen määrä on optimoitava (Wiksten 1996).

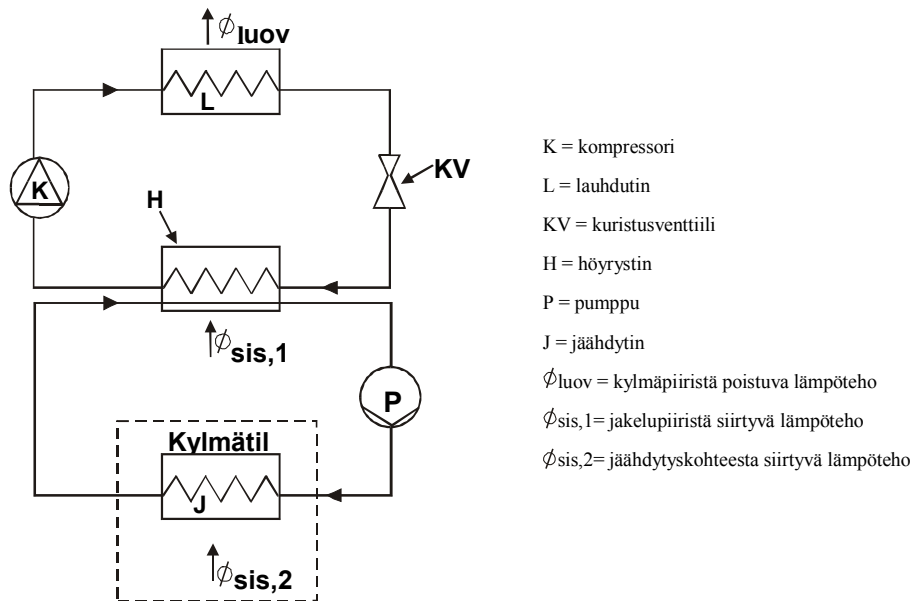
kylmäainepiirin (primääripiiri) lisäksi erillinen jäähdytyksen jakelupiiri (sekundääripiiri). Primääripiirissä kiertävän kylmäaineen tuottama jäähdytysteho siirtyy lämmönsiirtimen (höyrystimen) välityksellä sekundääripiirin lämmönsiirtoaineeseen¹¹, joka ei tavallisesti muuta prosessissa faasiaan. Välillisessä järjestelmässä kylmäaineen höyrystymislämpötila on alhaisempi kuin suorassa referenssijärjestelmässä, joka huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta.

Niin sanotuissa kaskadikytkennöissä on tavallaan yhdistetty kaksi suora- höyrystyskiertoa yhteisen lämmönvaihtimen välityksellä, joka toimii toisen kierron höyrystimenä ja toisen lauhduttimena. Kaskadikytkennöissä erotetaan yleensä matala- ja korkeapainepuoli. Kummallekin on mahdollista valita parhaiten soveltuva kylmäaine (Aittomäki et al. 1992).

Lämpöpumput toimivat vastaavalla periaatteella (suoralla tai välillisellä) kuin kylmälaitteet, mutta prosessin energiavirtojen suunta on käänteinen. Ne ottavat lämpöä esimerkiksi ulkoilmasta, maaperästä tai jokivedestä lämmittääkseen jonkin tilan.

Kylmähöyryprosesseissa myös lauhdutus on mahdollista toteuttaa joko suorana tai välillisenä. Välillisessä lauhdutuksessa järjestelmään on liitetty erillinen vesi- tai liuospiiri, jossa kierrätetään pumpun avulla lauhdutukseen käytettävää jäähdytysnesteitä. Nestepuolen hyvän lämmönsiirron vuoksi ja erityisesti käytettäessä levylämmönsiirtimiä lauhduttimen kylmäainepuolen sisätilavuus on pienempi kuin suorassa lauhdutuksessa. Välillisen lauhdutuksen lauhdumislämpötila on kuitenkin suoraa referenssijärjestelmää korkeampi, mikä huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta.

¹¹ Kylmäliuoksena voidaan käyttää useita erilaisia nesteitä, kuten erilaisten orgaanisten suolojen tai nesteiden vesiliuoksia sekä puhtaita orgaanisia nesteitä (Aittomäki et al. 1992).



Kuva 2. Kylmähöyryprosessin välillisen jäädytyksen periaate.

Jäädytyskoneiden hyötysuhdetta kuvataan niin sanotulla COP-arvolla (Coefficient of Performance), joka on systeemin tuottaman jäädytysenergian ja käyttämän nettotyön (yleensä sähköenergian) suhde. Lämpöpumpuille käytetään myös COP-arvoa, joka kuvaa tuotettua lämpöenergiaa suhteessa tarvittavaan nettotyöhön. Kompressorikoneiden COP-arvo on tavallisesti 1,5–5 riippuen muun muassa käytettävästä kylmäaineesta ja toimintalämpötiloista (Sandler 1999). Välillisten jäädytysjärjestelmien höyrystimeen aiheutuvan ylimääräisen lämpötilaeron vuoksi niiden hyötysuhde on alhaisempi kuin vastaavalla suoralla kytkennällä (Aittomäki et al. 1992). Myös sekundaaripiirin lämmönsiirtoaineen kierrätyspumppu lisää energiantarvetta. Välillisen jäädytysjärjestelmän avulla kylmäainetäytöstä voidaan kuitenkin pienentää huomattavasti suoraan referenssijärjestelmään verrattuna. Pienimmilleen (noin kymmenykseen alkuperäisestä) kylmäainetäytös saadaan käyttämällä myös välillistä lauhdutusta (Kaappola 2001). Tällöin kuitenkin järjestelmän hyötysuhde huononee lauhduttimeen aiheutuvan ylimääräisen lämpötilaeron vuoksi ja energiankulutus kasvaa myös lisääntyneestä pumppaustehontarpeesta johtuen.

Kylmälaitteiden suorat kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat laitteiden sisältämästä kylmäaineesta, jota tietyillä mekanismeilla pääsee vapautumaan ympäristöön. Tällaisia mekanismeja ovat käytön aikaiset vuodot, joita voivat aiheuttaa esimerkiksi putkiyhteissä ja muissa liitoksissa tapahtuvat vauriot tai materiaalin lävitse tapahtuva diffuusio. Lisäksi kylmäainetta saattaa päästä ilmaan esimerkiksi laitteistojen rikkoutumisen, tahattomien käsittelyvirheiden ja tahallisen päästämisen seurauksena. Päästöjä aiheutuu myös laitteiden kylmäainetäytöjen (valmistuksen tai huollon) ja -poistojen (huollon tai käytöstäpoiston) aikana tapahtuvista häviöistä.

Kylmälaitteiden käyttö aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä yleensä myös epäsuorasti. Ne ovat seurauksena laitteiden suoranaisen tai niihin liittyvän energiankulutuksen tuotannosta aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä (pääasiassa hiilidioksidista). Suoranainen energiankulutus riippuu tarvittavan jäähdytystehon ja käytettävän kylmäaineen termodynaamisten ominaisuuksien lisäksi esimerkiksi laitteiston komponenttien tai konstruktion energiahyötysuhteesta. Laitteisiin liittyvää energiankulutusta aiheuttaa laitteen omasta painosta, kun sijoituskohteena on kulkuneuvo.

Arvioiden mukaan kylmälaitosten aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä keskimäärin 20 % aiheutuu kylmäaineista ja noin 80 % laitosten primäärienergian tarpeen tuottamisessa syntyvistä hiilidioksidipäästöistä (IIR 2000). Osuudet vaihtelevat kuitenkin varsin paljon riippuen ensisijaisesti laitteiden tiiviyydestä. Maailmanlaajuisesti erilaiset kylmä- ja ilmastointilaitteet sekä lämpöpumput kuluttavat arviolta noin 15 % kaikesta maailmassa tuotetusta sähköenergiasta (IIR 2000).

4.1.3 Kylmähöyryprosessien kylmäaineet

Vaikka kylmähöyryprosessit ovat pääperiaatteiltaan keskenään hyvin samankaltaisia, riippuvat esimerkiksi tarvittava jäähdytysteho, jäähdytyksen jakelulämpötila ja siten kylmäainekierron toimintalämpötilat ja -paineet prosessista tai sovelluksesta. Tästä syystä tarvitaan ominaisuuksiltaan erilaisia kylmäaineita, joille on kuitenkin olemassa yhteisiä suotavia piirteitä. Hyvältä kylmäaineelta vaaditaan sopivaa höyrystymislämpötilan painetta, jonka tulee mieluummin olla hieman yli ilmanpaineen, jotta vältetään ilmavuoto koneistoon (Wiksten 1996). Toisaalta paine ei saa olla kovin suuri, koska silloin tarvitaan lujussyistä kalliit ja raskaat rakenteet. Myös kohtuullinen lauhtumispaineen ja höyrystymispaineen suhde sekä kemiallinen pysyvyys ovat oleellisia (Wiksten 1996). Laitteiston kannalta kylmäaineen olisi hyvä olla korroosiota aiheuttamaton ja täydellisesti sekoittuva voiteluöljyn kanssa, sillä muuten voiteluöljy saattaa kerääntyä höyrystimeen, estää lämmönsiirron kylmäaineeseen ja aiheuttaa vaurioita kompressorille (Nydal 1994). Energiahyötysuhteen kannalta pieni moolimassa ja vastaavasti suuri höyrystymisentalpia sekä lämpökapasiteetti ovat ihanteellisia (UNEP 1999a). Ympäristöä ja turvallisuutta ajatellen mahdollisimman alhainen ODP- (ozone depleting potential) ja GWP- (global warming potential) arvo sekä myrkyttömyys ja syttymättömyys ovat tärkeitä kriteereitä. Kylmäaineen tulisi myös olla mahdollisimman halpaa.

Kylmäaineiden nimeämisessä noudatetaan kansainvälisesti sovittua merkintätapaa. Kaikille kylmäaineille käytetään kirjainta R (= refrigerant), mutta niiden numerointi riippuu kemiallisesta koostumuksesta. Numeroinnin periaatteet esitetään liitteessä B. Aiemmin suurin osa jäähdytystarpeesta pystyttiin tyydyttämään neljällä CFC- ja HCFC-

pitoisella kylmäaineella, jotka ovat nimeltään R-11, R-12, R-22 ja R-502. Suomessa CFC-yhdisteiden käyttö kylmäaineena uusissa kylmälaitteissa kiellettiin Montrealin pöytäkirjan toimeenpanevassa kansallisessa lainsäädännössä (VNp 677/1993) vuoden 1995 alusta. Vastaavasti HCFC-yhdisteiden käyttö on Suomessa kielletty 31.12.1999 jälkeen asennettavissa ja valmistettavissa kylmälaitteissa (VNp 262/1998). Käytössä olevia CFC- ja HCFC-yhdisteillä toimivia kylmälaitteita huolletaan joko vastaavalla varastossa olevalla tai kierrätetyllä kylmäaineella sekä niin sanotuilla huolto-kylmäaineilla (ks. liite B, taulukko B-1), jotka on kehitetty ainakin jollakin asteella sopiviksi näihin laitteisiin. 1990-luvulta markkinoille on tullut jatkuvasti lisää erilaisilla HFC-yhdisteillä ja näiden seoksilla toimivia kylmälaitteita. Koska CFC- ja HCFC-yhdisteiden korvaaminen ei ole ollut aivan yksinkertaista, on käytössä tällä hetkellä lukuisa joukko erilaisia kylmäaineita (liite B, taulukko B-1). Kylmäaineiden lukumäärään ovat vaikuttaneet myös kaupalliset syyt. Halogenoiduille hiilivedyille vaihtoehtoisia kylmäaineita ovat esimerkiksi hiilivedyt, ammoniakki, hiilidioksidi ja vesi. Näitä yhdisteitä on tietyissä sovelluksissa myös kaupallisessa käytössä.

4.1.3.1 Hiilivedyt (HC)

Hiilivetyjen termodynaamiset ominaisuudet ja yhteensopivuus materiaalien kanssa ovat usein lähes samankaltaisia kuin halogenoitujen kylmäaineiden. Myös energiahyötysuhde on tavallisesti yhtä hyvä tai jopa hiukan parempi kuin halogenoitujen hiilivetyjen (van Gerwen 2000). Hiilivedyille ei ole määritelty GWP-arvoa, vaikka ne vaikuttavat kasviuoneilmiön voimistumiseen epäsuorasti osallistumalla alailmakehän otsonin muodostamiseen (IPCC 1996). Hiilivetyjen merkittävänä haittapuolena on kuitenkin syttyvyys (liite B, taulukko B-1), jonka takia realistiset sovelluskohteet ovat yksiköitä, joissa kylmäaineen täytösmäärät ovat suhteellisen pieniä ja turvallisuus on taattu¹². Keskisuurissa koneistoissa hiilivetyjen käyttö edellyttää usein täysin välillistä (jäähdytys ja lauhdutus) järjestelmää, jotta kylmäainetäytös saadaan mahdollisimman pieneksi. Tällöin kuitenkin energiankulutus lisääntyy vastaavaan suoraan toteutukseen verrattuna.

4.1.3.2 Ammoniakki (NH₃)

Ammoniakilla on pienin molekyyli massa kaikista kaupallisista kylmäaineista. Lisäksi sen höyrystymisentalpia on korkea ja lämmönsiirto-ominaisuudet ovat hyvät, joten sen

¹² Kansainvälinen kompressorivalmistajien yhdistys (ASERCOM) ei tue tekniikkaa, jossa palavan kylmäaineen täytös on yli 150 g, ja useat kompressorivalmistajat käyttävät tätä rajaa. Markkinoilla on kuitenkin täysin välillisiä propaanilla toimivia koneistoja, joissa kylmäainetäytös on 55–60 % vastaavaan R-22-koneistoon verrattuna (Kaappola 2001).

termodynaamiset ominaisuudet kylmäainekäyttöön ovat erinomaiset (UNEP 1999a). Ammoniakki soveltuu käytettäväksi niin kylmä- kuin pakastevarastojen lämpötiloissa (Lamberg et al. 2000). Se on myös hinnaltaan edullinen kylmäaine. Ammoniakki on kuitenkin myrkyllistä, tietyissä rajoissa syttyvää (16–25 tilavuusprosentissa), ja se syövyttää eräitä metalleja, kuten kuparia, alumiinia ja näiden seoksia (Lamberg et al. 2000). Se ei myöskään sekoitu mineraaliöljyihin, ja lisäksi pieni massavirta on ongelma, kun kylmäaineen syöttöä säädetään pienillä tehoilla (Aittomäki et al. 1992). Näistä seikoista johtuen ammoniakkia käyttävät kylmälaitokset joudutaan toteuttamaan suurelta osin erilaisella tekniikalla verrattuna HFC- tai HCFC-yhdisteillä toimiviin laitoihin. Ammoniakki ei sovellu käytettäväksi pienissä hermeettisissä kompressoreissa, johtuen materiaalivaatimusten ja turvallisuuskriteereiden huomioimisen aiheuttamista ongelmista (van Gerwen 2000), (UNEP 1999a). Se ei myöskään sovellu kovin hyvin keskipakoiskompressoreihin pienen molekyyli­massansa vuoksi. Myrkyllisyys rajoittaa ammoniak­in käytön kohteisiin, joissa kylmäaine voidaan pitää ihmisten ulottumattomilla. Muissa kuin sopivissa teollisissa sovelluksissa toimenpide vaatii yleensä välillisen järjestelmän ja tehokkaasti järjestetyn hätä­tuuletuksen vuotojen varalle.

4.1.3.3 Hiilidioksidi (CO₂)

Hiilidioksidi on melkein käytöstä poistunut kylmäaine, joka on kuitenkin herättänyt uudelleen laajaa mielenkiintoa muun muassa hyvien prototyyppitulosten ansiosta. Hiilidioksidi on palamatonta ja myrkyllistä ainoastaan yli 10 %:n pitoisuuksissa ilmassa (UNEP 1999a). Hiilidioksidin käyttöön liittyvät pääasialliset ongelmat ovat sen hankalat termodynaamiset ominaisuudet, kuten alhainen kriittinen lämpötila (31,1 °C) ja hiili­happojään muodostus sekä korkea toimintapaine.

Mikäli hiilidioksidia käytetään kylmähöyryprosesseissa, joissa lämmönhylkiminen tapahtuu alikriittisessä tilassa, se toimii vastaavanlaisena kylmäaineena kuin mikä tahansa höyryn puristamiseen perustuva kylmäaine. Hiilidioksidin ominaisjäähdytys­kapasiteetti ja puristushyötysuhde ovat tällöin oleellisesti paremmat kuin muilla kylmä­aineilla (UNEP 1999a). Sovelluskohteita ovat esimerkiksi sopivien kaskadikytkentöjen matalapainepuolen kierrot.

Mikäli lämmönvaihto tapahtuu ylikriittisessä tilassa, ei höyryä voida nesteyttää vakiolämpötilassa vaan lauhtuminen tapahtuu asteittain lämpötilan ja paineen laskiessa. Tällaisissa sovelluksissa ylikriittistä hiilidioksidihöyryä jäähdytetään korkeapaine­puolella kaasujäähdyttimellä (yleensä ulkoilmalla) lähelle ympäristön lämpötilaa. Ylikriittisen CO₂-kierron energiahyötysuhde on yleensä alhaisempi kuin kilpailevien kylmäaineiden. Ratkaisevana tekijänä on muun muassa kaasujäähdyttimelle saapuvan

ilman lämpötila. Ylikriittisen hiilidioksidikierron ongelmana on myöskin korkea höyrynpaine.

4.1.3.4 Vesi (H₂O)

Vettä käytettiin kylmäaineena suurissa matalapaineisissa höyrykompressori-järjestelmissä jo 1900-luvun alussa. Vesihöyryn alhainen tiheys ja suhteellisen korkea jäätymispiste aiheuttivat kuitenkin ongelmia, ja veden käytöstä on hyvin pitkälti luovuttu. Mikäli veden käytöllä voidaan kuitenkin vähentää lämmönsiirtimien lukumäärää (esimerkiksi prosessiveden lämpötilaa muuttamalla), saattaa se mahdollistaa noin 30–40 % paremman energiahyötysuhteen kuin parhaat mahdolliset HFC- tai ammoniakki-käyttöiset kylmäjärjestelmät (UNEP 1999a). Tällaisia sovelluskohteita on kuitenkin rajoitetusti. Vettä voidaan käyttää myös erilaisissa jäävaraajissa, joissa jäähdytysputkisto sijoitetaan vesialtaaseen tai -säiliöön. Jäävaraajat ovat tehokkaimmillaan, kun jäähdytystarve on lyhytaikaista ja noin 2–3 °C:n lämpötila riittää (Aittomäki et al. 1992).

Vettä ja erilaisia vesiliuoksia käytetään hyvin paljon lämmönsiirtoaineena välillisissä järjestelmissä. Viime aikoina on myös kehitetty järjestelmiä, joilla tuotetaan alipaineista pumpattavissa olevaa pienistä jääkiteistä ja vesiliuoksesta koostuvaa kylmäseosta. Uudet kylmäseostekniikat ovat lupaavia erityisesti täysin nestemäisen lämmönsiirtoaineen korvaamisessa. Ne eivät ole kuitenkaan toistaiseksi saavuttaneet kaupallista suosiota.

4.1.4 Teknisten päästövähennysmenetelmien periaatteet

Kylmä- ja ilmastointilaitteiden sekä lämpöpumppujen kylmäainepäästöjä vähennettäessä tulee aina huomioida järjestelmien käyttämän energian tuotannossa syntyvät päästöt. Mikäli päästövähennystoimi aiheuttaa referenssijärjestelmän energiankulutuksen lisääntymisen, tulee toimella koko järjestelmän elinkaaren aikana saavutettavan kylmäainepäästöjen vähenemän olla hiilidioksidiekvivalenteissa mitattuna suurempi kuin lisääntyneen energiankulutuksen tuotannossa aiheutuvat päästöt. Muussa tapauksessa päästövähennystoimen kokonaishyöty ilmastonmuutoksen lieventämisen kannalta on negatiivinen.

4.1.4.1 Vaihtoehtoiset kylmäteknikat

Kylmähöyryprosesseista vapautuvien fluorattujen yhdisteiden päästöjä voidaan pyrkiä vähentämään kokonaan erilaisilla tekniikoilla. Kylmähöyryprosessien tilalle on kehitetty ja kehitetään jatkuvasti uusia jäähdytystekniikoita, jotka eivät perustu käänteiseen Clausius-Rankinen prosessiin, eivätkä sisällä fluorattuja tai lainkaan kylmäaineita. Vaihtoehtoisten tekniikoiden toteutettavuus ja sovellettavuus saattavat kuitenkin aiheuttaa ongelmia. Tiettyä kylmähöyryprosessia korvaamaan ajateltu tekniikka saattaa myös olla energiatehokkuudeltaan huonompi, jolloin saavutettava kokonaispäästövähennys on kyseenalainen ja se on selvitettävä. Tällä hetkellä yleisesti tunnetut kylmähöyryprosessin vaihtoehtoiset tekniikat luetellaan taulukossa 4.

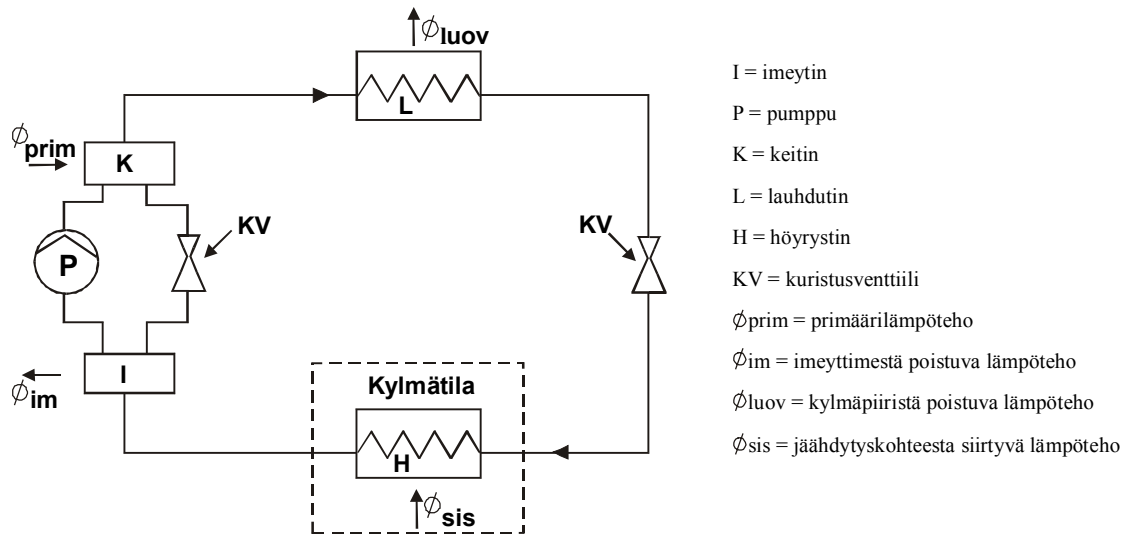
Taulukko 4. Yleisesti tunnetut kylmähöyryprosessien vaihtoehtoiset tekniikat, niiden arvioitu tekninen kypsyyks, energiahyötysuhde ja sovellettavuus (van Gerwen 2000).

tekniikka	tekniikan kypsyyks	energiatyötysuhde	sovellettavuus
sorptio	+	-/+	-/0
ilmakierto (Joyle-Brayton)	0	-/+	-/0
Stirling	-/0	-/0	-
lämpökustiiikka	-	-/0	-
sähköosmoosi	-	0?	?
Peltier	+	-	-
haihdutusjäähdytys	0/+	+	-

(+: korkea, 0: keskinkertainen, -: alhainen)

Taulukosta 4 havaitaan, että monet vaihtoehtoisista tekniikoista ovat teknisesti vielä liian alhaisella tasolla saavuttaakseen kaupallista suosiota tai niiden soveltuvuus on hyvin rajoitettu. Myös alhainen energiatehokkuus vaikeuttaa joidenkin tekniikoiden käyttöönottoa tai niiden kannattavuutta kokonaispäästöjen vähentämisessä. Sen sijaan sorptioprosessit ovat olleet teollisuuden käytössä jo 1800-luvun loppupuolelta asti. Erityisesti absorptioprosessien tekniikka on kaupallisella tasolla ja prosessit ovat energiatehokkaita silloin, kun jätelämpöä on riittävästi saatavilla prosessien primäärienergiaksi.

Absorptiokone voidaan ajatella kompressorikoneeksi, joka toimii lämpöenergialla mekaanisen energian sijasta. Energia voi tulla kaasun tai öljyn poltosta sekä muun muassa kaukolämmöstä. Absorptiokoneen toimintaperiaate on kuvassa 3.



Kuva 3. Absorptiokoneen toimintaperiaate (Herold et al. 1996).

Koneessa kiertää työainepari, joka toimii kylmäaineena ja absorbenttina. Työainepari on yleensä joko vesi-litiumbromidi (LiBr) tai ammoniakki-vesi (ensin mainittu kylmäaine). H₂O-LiBr-työaineparilla voidaan tuottaa alimmillaan +5 °C:n (Koljonen & Sipilä 1998) ja NH₃-H₂O-parilla -40 °C:n (Aittomäki 2001) jäähdytyslämpötila. Litiumbromidin käyttöä rajoittaa sen kiteytymisraja (noin +4 °C), ammoniakkia puolestaan myrkyllisyys (Koljonen & Sipilä 1998). Myös muita nestepareja on kokeiltu, mutta ne eivät ole saavuttaneet kaupallista astetta. Höyrystynyt kylmäaine absorboidaan imeyttimessä liuottimeen eli absorbenttiin. Laimea liuos pumpataan korkeampaan paineeseen höyrystimeen, jossa ulkopuolisella energialla vesi höyrystetään liuksesta erilleen. Tämä prosessiosa vastaa lämpövoimakoneen suorittamaa työtä ja korvaa mekaanisen komprimoinnin. Imeytintä joudutaan jäähdyttämään lauhtumis- ja liukenemislämmön kompensoimiseksi. Yleensä jäähdytys tapahtuu jäähdystornista syötettävällä vedellä. Absorptiokoneet tuottavat kompressorikoneita enemmän lämpöä. Keittimessä kylmäaine vapautetaan ja väkevöity liuos palautetaan imeyttimeen lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin kautta (Koljonen & Sipilä 1998). Absorptioprosesseja on kehitetty ja otettu käyttöön lukuisia erilaisia. Koneiden COP-arvo (0,35–1,35) riippuu prosessin lisäksi muun muassa käytettävästä työaineesta ja lämmönlähteestä. Prosessi ja työaine puolestaan valitaan pääasiassa tarvittavan jäähdystehon ja käytössä olevan lämmönlähteen perusteella (Herold et al. 1996). Absorptiokoneet ovat yksinkertaisuutensa vuoksi toimivuudeltaan erittäin luotettavia ja niiden huollon tarve on vähäinen.

4.1.4.2 Vaihtoehtoiset kylmäaineet

Koska kylmähöyryprosessien korvaaminen vaihtoehtoisilla tekniikoilla on monissa tapauksissa mahdotonta tai hyvin hankalaa, voidaan kylmäaineista aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä pyrkiä vähentämään käyttämällä pienemmän tai mieluummin mitättömän GWP-arvon omaavia aineita, jotka eivät tuhoa otsonia eivätkä lisää energiankulutusta niin paljon, että energiantuotannosta aiheutuvat päästöt ylittävät saavutettavan hyödyn. Yleisesti käytössä olevat halogenoitujen hiilivetyjen vaihtoehtoiset kylmäaineet esitellään kohdissa 4.1.3.1–4.1.3.4. Useissa tapauksissa olemassa olevaan kylmälaitekonstruktioon ei voida ottaa käyttöön erilaista kylmäainetta ilman muutoksia. Järjestelmään tarvittavien muutosten määrä ja laatu puolestaan vaikuttavat kustannuksiin ja myös saavutettavaan energiatehokkuuteen.

Mikäli vaihtoehtoisen kylmäaineen käyttö edellyttää turvallisuussyistä välillisen jäähdytysjärjestelmän käyttöönottoa, aiheutuu järjestelmän hyötysuhteen huononemisesta ja lämmönsiirtoaineen pumppaustarpeesta energiankulutuksen lisääntymistä. Välilliset jäähdytysjärjestelmät ovat tehokkaimmillaan tasaisissa jäähdytyskuormituksissa. Vaihtelevat kuormitukset ja useiden erilaisten lämpötilatasojen tarve aiheuttavat ongelmia välillisen jäähdytyksen soveltavuudelle.

Joissakin tapauksissa myrkyllisen tai syttyvän kylmäaineen täytöksen saaminen riittävän pieneksi edellyttää myös välillisen lauhdutuksen käyttöä, joka lisää edelleen energiankulutusta, mikäli sitä ei muuten käytettäisi. Jos välillisellä lauhdutuksella voidaan parantaa lauhdelämmöntalteenoton hyötykäyttöä, pienenee välillisestä lauhdutuksesta johtuvan lisääntyneen sähkönkulutuksen tuotannon aiheuttama ilmastonmuutoshaitta sähköntuotannon ja korvattavan lämmöntuotannon aiheuttaman haitan erotuksella.

4.1.4.3 Päästöjen hallinta ja parannettu laitekonstruktio

Käytössä olevien kylmälaitteiden päästöihin voidaan vaikuttaa parhaiten toimilla, joilla kylmäainevuotoja saadaan pienennettyä. Toimien tehokkuus ja taloudellisuus riippuvat hyvin paljon sovelluksesta ja esiintyvistä vuotomääristä. Erilaisten vuodonhavaitsemistoimien (hälyttimien¹³ tai väriaineen¹⁴) käyttöönotto ja vuotavien komponenttien uusiminen tai tiivistäminen saattavat alentaa päästöjä merkittävästi. Vuodonhavaitsemistoimet ovat käytössä jo useimmissa suurissa kylmälaitoksissa.

¹³ Konehuoneisiin sijoitettavat vuodonilmaisimet maksavat noin 4 000–5 000 markkaa. Suurissa koneistoissa voidaan käyttää nestesäiliössä pinnan alarajakytkintä (noin 1 500 mk) (Kaappola 2001).

¹⁴ Osa kompressorivalmistajista ei hyväksy väriaineen käyttöä koneiston takuuajana (Kaappola 2001).

Uusien laitekonstruktioiden vuotoihin voidaan vaikuttaa parhaiten käyttämällä mahdollisimman paljon juotosliitoksia eri komponenttien välillä ja valitsemalla laadukkaampia komponentteja. Perinteiset laippamutterit voidaan korvata niin sanotuilla juotosadaptoreilla, jotka ovat merkittävästi edellä mainittuja tiiviimpiä (Kaappola 2001). Joissakin tapauksissa suoran järjestelmän korvaaminen välillisellä (jäähdytyksellä, lauhdutuksella tai molemmilla) vähentää potentiaalisten vuotokohtien lukumäärää runsaasti ja lisäksi kylmäainetäytöstä saadaan tällöin pienennettyä. Kylmäainetäytös voidaankin pyrkiä minimoimaan valitsemalla kylmäkiertopiirin sisäinen tilavuus mahdollisimman pieneksi. Osittain tähän voidaan vaikuttaa lämmönsiirtimien valinnalla, jossa tosin suurin muutos on jo saavutettu levylämmönsiirtimien voimakkaalla yleistymisellä (Aittomäki 2000).

Myös kylmäaineen talteenotolla, kierrätyksellä tai asianmukaisella hävityksellä laitteen huollon ja käytöstäpoiston yhteydessä voidaan vaikuttaa päästöihin. Mitä tiiviimpiä laitteet ovat, sitä tärkeämpää on huollon ja käytöstäpoiston aikainen päästöjen hallinta. Suurin osa koneistojen vioista aiheuttaa ennalta oireita, jotka voidaan havaita määräraikaistarkastuksissa (Kaappola 2001).

Nykyinen lainsäädäntö edellyttää, että yli 3 kg HCFC-kylmäainetta sisältävät kiinteät kylmälaitteet on tarkastettava vuosittain (EY 2037/2000). Euroopan Standardisointikomitean (CEN) normin EN 13313 mukaan muun muassa kylmälaitosten käyttäjille ja huoltajille on annettava koulutusta, jonka avulla osapuolten ammattitaito saadaan tasolle, jota säädettyjen normien toteuttaminen edellyttää. Euroopan Standardisointikomitean 11.11.1999 hyväksymässä ja Suomessa kesäkuussa 2000 voimaan tulleessa eurooppalaisessa standardissa EN 378 määritellään hyvin paljon erilaisia kylmälaitosten ja lämpöpumppujen suunnitteluun, toteutukseen, käyttöön, huoltoon ja käytöstäpoistoon liittyviä asioita, joilla pyritään täyttämään laitosten turvallisuus- ja ympäristövaatimukset mahdollisimman tehokkaasti (CEN 378/2000). Normien toteuttaminen tarkoittaa myös HFC-kylmäaineiden päästöjen merkittävää vähentymistä viime aikaisista tasoista. Asiantuntijoiden näkemysten mukaan käytössä olevien laitosten kylmäainevuotoja saadaan vähennettyä 40–50 % ja uusien asennettavien laitosten 50–60 % (Kaappola 2001). Toimien toteuttaminen lisää uusien laitosten investointikustannuksia arviolta 2–3 % ja huoltokustannuksia noin 50 %, sovelluksesta riippuen (Harnisch & Hendriks 2000), (Kaappola 2001).

4.1.5 Kodin kylmälaitteet

4.1.5.1 Yleistä

Kodin kylmälaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä alle 1 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 4) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 0,2 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja 0,001 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Kotitalouksien kylmälaitteisiin kuuluvat useat erilaiset jääkaapit, pakastimet ja niiden yhdistelmät. Laitteiden kylmäaineenkierto on tavallisesti toteutettu suoraohyrystyksellä. Kylmäaineen paineistamiseen käytetään hermeettisiä moottorikompressoreja, joissa sekä sähkömoottori että kompressori on sijoitettu yhteen kaasutiiviiseen koteloon. Moottorin ja kompressorin tarvitsema voiteluöljy laitetaan kompressoriin jo tehtaalla, eikä öljyn lisäystä yleensä jouduta tekemään koko käyttöaikana. Kylmäaineena käytettiin perinteisesti CFC-12:ta, jonka käyttö uusissa laitteissa kiellettiin Suomessa vuoden 1995 alusta. Kodin kylmälaitteiden CFC-12 korvattiin teollisuusmaissa HFC-134a:lla tai isobutaanilla (Little 1999), jonka käyttöön Pohjois-Euroopassa ja etenkin Saksassa monet laitevalmistajat siirtyivät (Öko-Recherche 1999). Isobutaanin markkinaosuus kodinkylmälaitteissa on Euroopassa noin 45 % (IPCC 2001).

HFC-134a:ta kylmäaineenaan käyttävien kodin kylmälaitteiden valmistus ja maahantuonti Suomeen alkoi vuonna 1993 (Oinonen 2000). Isobutaanin suhteellinen osuus markkinoilla on kuitenkin jatkuvasti kasvanut, ja tällä hetkellä (toukokuu 2000) Suomessa myytävänä olevista laitetyypeistä hieman yli 50 % toimii HFC-134a:lla ja loput isobutaanilla (Adato 2000).

4.1.5.2 Peruskkenaario

Suomessa on 1990-luvulla otettu käyttöön vuosittain 200 000–270 000 uutta kodin kylmälaitetta. Laitteiden tarkat myyntitiedot ja niiden perusteella lasketut myyntiennusteet vuoteen 2010 saakka esitetään liitteessä C. Tässä työssä hyödynnettiin näitä tietoja, ja lisäksi myyntimäärien oletettiin pysyvän vakiona vuosina 2010–2020. Muut skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit esitetään taulukossa 5.

HFC-134a-laitteiden osuus Suomessa vuosittain käyttöön otettavasta laitemäärästä on noin 46 %, joka vastaa kylmäainemäärässä noin 40 %:a. Peruskkenaariossa tämän suhteen oletettiin pysyvän vakiona (taulukko 5). Kodinkylmälaitteiden valmistuksen päästöhäviö on tavallisesti alle 3 % kylmäainetäytöksestä. Toiminnanharjoittajien

vähäisyydestä johtuvan tiedon luottamuksellisuuden vuoksi valmistuksesta aiheutuvia päästöjä ei arvioitu. Käytön aikaiset päästöt ovat kylmäainekierron hermeettisyyden vuoksi yleensä hyvin vähäisiä (taulukko 5). Käytöstä poistettavista laitteista arvioitiin saatavan talteen 80 % kylmäaineesta (taulukko 5), (kohta 3.2.1). Kodin kylmlaitteiden HFC-134a-päästöjen perusskenaario on kuvassa 4.

4.1.5.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Koska kodinkylmlaitteet ovat tiiviitä, tulee kylmäainepäästöjen vähentämisessä kiinnittää erityistä huomiota laitteen energiatehokkuuteen, joka ei saa käytännössä olla huonompi kuin korvattavalla referenssijärjestelmällä. Palavan isobutaanin turvallisen käytön suorahöyrystykseen perustuvissa kodin kylmlaitteissa mahdollistavat laitteiden hermeettinen kylmäainekierto ja pienet täytösmäärät, jotka ovat tavallisesti alle 100 grammaa¹⁵. Koska lisäksi isobutaanilla on mahdollisuus saavuttaa kilpailukykyinen energiatehokkuus HFC-134a:han verrattuna, voidaan sen käyttöä lisäämällä saavuttaa arviolta 100 %:n päästövähennys. Markkinoilla on myös muun muassa pyörimisnopeuden säädöllä varustettuja isobutaanikompressoreita, joilla päästään erittäin hyvään hyötysuhteeseen (Kaappola 2001). Kodin kylmlaitteiden tuotannon muuttaminen palaville kylmäaineille vaatii tehtailta kuitenkin investointeja, jotta riittävä turvallisuus saavutetaan. Muutosten on arvioitu aiheuttavan keskimäärin noin 6 milj. mk:n investointikustannukset tehdasta kohden (Harnisch & Hendriks 2000). Julkaistujen tutkimusten mukaan isobutaanilaitteiden valmistaminen on laitetta kohti noin 80–190 mk kalliimpaa kuin HFC-134a-laitteiden (esimerkiksi Little 1999). HFC-134a:n perusskenaariotason mukainen (80 %:n) talteenotto laitteiden käytöstäpoiston yhteydessä maksaa arviolta 90 mk laitetta kohti (Harnisch & Hendriks 2000). Mikäli isobutaania ei tarvitse ottaa talteen, säästyvät talteenoton aiheuttamat kustannukset, jolloin isobutaanilaitteen nettolisäkustannukset HFC-134a-laitteeseen verrattuna pienevät selvästi. Isobutaani, kuten muutkin haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), edistävät kuitenkin kasvihuoneilmion voimistumista epäsuorasti (ks. kohta 4.1.3.1), ja siksi erilaisten VOC-direktiivien kehitystä on vaikea arvioida.

Liitteessä D esitetään tyypillisen eurooppalaisen kodinkylmlaitteen päästötaseita riippuen käytettävästä kylmäaineesta ja eristeestä. Tarkasteltaessa pelkän kylmäaineen vaikutusta kokonaispäästöihin havaitaan, että esimerkkitapauksen laitteen päästöjä on mahdollisuus pienentää 33 kg:aan CO₂-ekv. (80 %:n talteenotolla), mikäli käytetään isobutaania (liite D). Kun myös eristeiden (ks. kohta 4.2) vaikutus huomioidaan, on

¹⁵ Kotitalouksien isobutaanilaitteiden täytökset ovat pienimmillään 25–40 grammaa ja harvoin yli 100 grammaa (Hakala 2001).

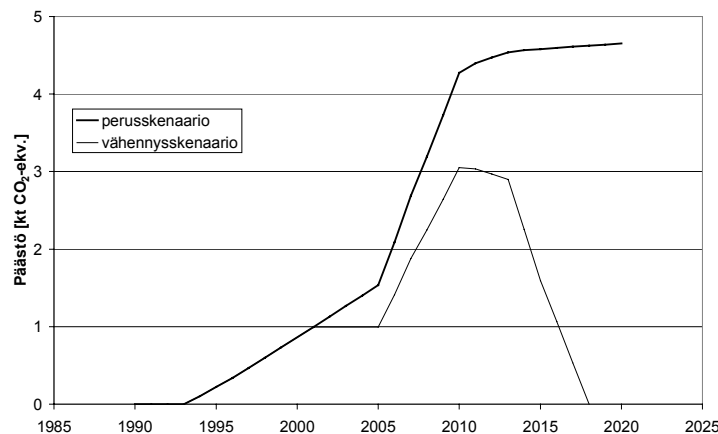
kylmäaineen vaihdolla saavutettava päästövähennys vain 2 % laitteen kokonaispäästöistä (liite D).

4.1.5.4 Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset

Päästövähennysmenetelmäksi valittiin HFC-134a-kylmäaineen korvaaminen 100-prosenttisesti isobutaanilla vuodesta 2002 eteenpäin (taulukko 5). Isobutaanilaitteiden hyötysuhde oletettiin yhtäläiseksi HFC-134a-laitteiden kanssa. Isobutaanilaitteen arviointiin olevan keskimäärin 135 mk kalliimpi kuin vastaavan HFC-134a-järjestelmän. Lisäkustannukset arvioitiin ainoastaan perusskenaarion sisältämän HFC-laitekannan korvaamiselle. Päästövähennysskenaario esitetään kuvassa 4.

Taulukko 5. Kodin kylmälaitteiden skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario	vähennysskenaario
käyttöönnotetut laitteet vuonna 2010	266 000 kpl	266 000 kpl
käyttöönnotettujen laitteiden muutos 2010–2020	+ 0 %/a	+ 0 %/a
laitteiden keskimääräinen täytös	0,1 kg	
uusien laitteiden kylmäaineet vuosina 1993–2001: - R-134a - R-600a (isobutaani)	40 % 60 %	
uusien laitteiden kylmäaineet vuosina 2002–2020: - R-134a - R-600a (isobutaani)	40 % 60 % ¹⁶	0 % 100 %
päästökertoimet: - käyttö - käytöstäpoisto	1 % 20 %	
laitteiden käyttöikä	15 a	15 a



Kuva 4. Perus- ja päästövähennysskenaario (isobutaanin 100-prosenttinen käyttö) kodin kylmälaitteiden HFC-134a-päästöille.

¹⁶ Kaappola (2001) arvioi, että isobutaanin markkinaosuus kasvaa suuremmaksi ja lisäksi propaani (R-290) saanee pienen osuuden markkinoilla.

Kuvassa 4 skenaarioiden päästöt kasvavat verrattain nopeasti vuosien 2005 ja 2010 välillä. Tämä johtuu latteiden käytöstäpoistumisen arvioidusta kiihtymisestä ja käytöstäpoistolle oletetusta suhteellisen suuresta (20 %) päästökertoimesta käyttöön (1 %) verrattuna. Vastaavasti päästövähennyskkenaariossa saavutetaan nopeasti 100 %:n päästövähennys, kun viimeiset HFC-134a-laitteet on arvioitu poistetun käytöstä.

Mikäli Suomessa vuodesta 2002 eteenpäin kodinkylmälaitteiden kylmäaineena on pelkästään isobutaani, saavutetaan Kioton ensimmäisenä velvoitekaudena keskimäärin noin 30 %:n ja vuonna 2020 100 %:n päästövähennys. Absoluuttiset päästövähennykset ovat kuitenkin hyvin pienet. Taulukossa 6 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina ja niihin mennessä (2012 ja 2020) vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 6. Kodin kylmälaitteiden päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennyskkenaario		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset	
			[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-
2000	1	1	-	-
KIOTO 1	4	3	300	22 000
2020	5	0	450	6 000

Taulukosta 6 voidaan havaita, että HFC-134a:n korvaaminen isobutaanilla kodin kylmälaitteissa on erittäin kallis päästövähennystoimenpide. Tämä johtuu laitteiden pienestä kylmäainetäytöksestä, kylmäainekierron hermeettisyydestä (käytön aikaiset päästöt hyvin vähäisiä) ja perusskenaariossa oletetusta kylmäaineen 80 %:n talteenotosta. Laitteen ostajalle aiheutuvia muutaman sadan markan lisäkustannuksia ei kuitenkaan voida pitää suurina usean vuoden ajalle tehtävästä investoinnista. Mikäli isobutaania ei tarvitse ottaa talteen laitteiden käytöstäpoiston yhteydessä, pienenevät rajakustannukset selvästi taulukossa 6 esitetyistä summista.

4.1.6 Kaupan kylmälaitokset

4.1.6.1 Yleistä

Kaupan kylmälaitokset aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 115 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 5) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 34 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,15 %:a Suomen kaikkien

Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Kaupan kylmäjärjestelmät voidaan jakaa itsenäisiin koneistoihin (omakoneelliset kylmäkalusteet), lauhdutusjärjestelmiin ja keskusjärjestelmiin. Omakoneellisia kalusteita ovat muun muassa jäädytetyt lasikaapit juomia tai jäädytettyjä tuotteita varten. Pienten omakoneellisten kalusteiden kapasiteetit ja tekniset ratkaisut ovat hyvin samankaltaisia kodin kylmälaitteiden kanssa.

Lauhdutusjärjestelmissä on nimensä mukaisesti varsinaisesta jäädytyslaitteesta (höyrystimestä) erotettu kompressori- ja lauhdutyksikkö eli kompressorilauhdutin, joka koostuu yhdestä tai kahdesta kompressorista, nestesäiliöstä (varaaja) ja lauhduttimesta (UNEP 1998b). Tyypillisiä sovelluskohteita ovat pienet kylmähuoneet, prosessilaitteet ja myyntiautomaatit (UNEP 1998b).

Keskusjärjestelmissä jäädytysenergia tuotetaan keskitetysti konehuoneeseen sijoitetussa jäädytyslaitteistossa, jonka koneistamisessa on käytetty pääosin kahta eri periaatetta. Osa laitoksista on toteutettu käyttäen yksittäisiä kompressoreita, jotka jäädyttävät yhdestä kolmeen kylmäkalustetta tai -huonetta. Kaikkien kohteiden jäädytystarve ei kuitenkaan esiinny aina samanaikaisesti, jolloin koneiston hyötysuhde alenee 10–15 % riippuen muun muassa alkuperäisten komponenttien mitoituksista (Kaappola 2001). Osa laitoksista on koneistettu kytkemällä yhteiseen konepukkiin rinnan kolmesta kuuteen kompressoria. Tähän periaatteeseen on saavutettavan paremman hyötysuhteen sekä joustavamman kylmäkalusteiden lukumäärän ja paikkojen vaihdeltavuuden vuoksi siirrytty Suomessa noin kymmenen vuotta sitten (Kaappola 2001). Rinnan kytketyt kompressorit jäädyttävät joko kylmäpuolen tai pakkaspuolen kalusteita ja huoneita (Aula et al. 1999). Keskusjärjestelmissä jäädytyksen jakelu kalusteisiin (erilaisiin kylmä- ja pakastuskaappeihin sekä -altaisiin) ja huoneisiin toteutetaan joko suora-höyrystyksellä tai välillisesti sekundääripiirin avulla. Jäädytettävät kalusteet on tavallisesti sijoitettu myyntitiloihin, jotka saattavat sijaita kaukana konehuoneesta. Putkistopituuden, liitosten lukumäärän ja kylmäainetäytöksen kasvaessa myös järjestelmän vuotopotentiali kasvaa. Keskusjärjestelmien jäädytyskapasiteetit ovat yleensä 20–1 000 kW (UNEP 1998b).

Jäädytysenergia voidaan tuottaa myös hajautetusti. Tällöin kompressorit sijoitetaan myyntitilaan mahdollisimman lähelle jäädytettäviä kohteita, jolloin tarvittava kylmäaineputkisto saadaan mahdollisimman lyhyeksi. Kompressoreilla syntyvä lauhde poistetaan laitteille yhteisen jäädytysvesikierron välityksellä. Hajautetusti toteutetun jäädytyksen ongelmana on keskusjärjestelmää huonompi hyötysuhde. Lisäksi laitteistojen äänen takia joudutaan rakentamaan useita äänieristettyjä ilmanvaihdolla varustettuja konehuoneita (Kaappola 2001).

Elintarvikemyymälää tulee yleensä lämmittää, kun ulkoilman lämpötila laskee alle halutun sisälämpötilan (Suomessa suurimman osan vuodesta). Kylmäkoneistojen lauhdelämmön hyödyntäminen sisäilman lämmityksessä onkin ollut Suomessa käytössä jo yli 20 vuotta. Lauhdelämpö saadaan yleensä hyödynnettyä taloudellisimmin keskusjärjestelmien rinnankytketyillä koneistoilla (Kaappola 2001). Tehokkaan kylmä-, LVI- ja automatiikkasuunnittelun avulla voidaan välillisellä lauhdutuksella helpottaa lauhdelämmöntalteenoton käyttömahdollisuuksia.

Suomessa kaupan kylmälaitteiden ja -laitosten toiminta perustuu tällä hetkellä lähes poikkeuksetta suora-tyrskytykseen. Tällaisissa järjestelmissä on kylmäainetäytös kylmäpuolella tavallisesti 1–1,5 kg/kW ja vastaavasti pakkaspuolella 3–4 kg/kW¹⁷ (UNEP 1998b). Kaupan kylmäkalusteiden ja -huoneiden kokonaisjäähdytystehot ovat yleensä 60–600 kW (Kaappola 2001). Vastaavasti pakastekalusteiden ja -huoneiden kokonaisjäähdytystehot ovat 10–100 kW (Kaappola 2001). Kioskien ja huoltoasemien jäähdytystehot ovat yleensä edellä mainittuja pienemmät. Aikaisemmin kaupan kylmälaitteiden ja -laitosten yleisimmät kylmäaineet olivat CFC-12, HCFC-22 sekä CFC-115:n ja HCFC-22:n seos R-502 (Oinonen 2000, Little 1999). Näistä R-12 soveltuu ainoastaan kylmälämpötiloille, mutta R-22 ja R-502 soveltuvat myös pakastuslämpötiloille (UNEP 1998b). Suomessa R-22 on ollut yleisin kaupan kylmälaitoksissa käytetty kylmäaine, joka on uusissa asennettavissa laitoksissa (R-502:n tavoin) korvautumassa¹⁸ (ks. kohta 4.1.3) nopeasti HFC-yhdisteistä koostuvalla seoksella R-404A (ks. liite B, taulukko B-1). Omakoneellisissa kylmäkalusteissa aiemmin käytetty R-12 on korvattu pääasiassa HFC-134a:lla (Oinonen 2000).

4.1.6.2 Perusskenaario

Suomessa asennettiin vuonna 1999 yhteensä noin 1 000 uutta kaupan käyttöön tarkoitettua kylmälaitosta. Näihin laitoksiin täytettiin yhteensä noin 100 t uutta kylmäainetta. Laitosten keskimääräiset kylmäainetäytökset vaihtelivat muutamasta kilogrammasta useisiin satoihin kilogrammoihin. Suuriin laitoksiin (täytös satoja kilogrammoja) täytettiin noin 80 % kokonaiskylmäainemäärästä. Kaupan kylmälaitosten skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit esitetään taulukossa 8.

Perusskenaariossa ennen vuotta 1999 käytettyjen otsonia tuhoavien kylmäaineiden korvautumisen R-404A:lla oletettiin tapahtuvan lineaarisesti siten, että asennetusta kylmäaineesta R-404A:n osuus on 0 % vuonna 1993 ja 100 % vuonna 2000, mistä

¹⁷ Kylmäainetäytös tehoa kohden riippuu muun muassa siitä, onko lauhdutus toteutettu suoralla vai välillisellä periaatteella. Lisäksi lämmöntalteenotossa mahdollisesti käytettävät lisälauhduttimet suurentavat täytöstä.

¹⁸ R-404A:ta on käytetty kaupan kylmälaitoksien yleiskylmäaineena jo 7–8 vuotta (Kaappola 2001).

eteenpäin kaiken asennetun kylmäaineen oletettiin olevan R-404A:ta. Laskennan yksinkertaistamiseksi aiemmin mahdollisesti asennetut pienet määrät muita HFC-kylmäaineita jätettiin huomiotta. Vuosittain asennettavan kylmäainemäärän oletettiin kasvavan 2 % vuodessa vuosina 2000–2020. Oletetun kasvun tarkoituksena on huomioida elintarvikemyymälöiden yksikkökoon suureneminen ja kylmäsäilytystä vaativien elintarvikkeiden, kuten einesten, kulutuksen kasvu. Tällä hetkellä etenkin suuret (super- ja hypermarkettien) ja vastaavasti pienet (kioskien, huoltoasemien yms.) laitokset ovat yleistymässä. Kylmälaitosten toiminnan oletettiin perusskenaariossa perustuvan suoraohjaukseen, Suomessa vallitsevan nykytilan mukaisesti. Kaupan kylmälaitosten perusskenaario esitetään kuvassa 5.

4.1.6.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Pitkiä putkia ja paljon potentiaalisia vuotokohtia sisältävät suorat laitokset voidaan korvata täysin välillisillä (jäähdytys ja lauhdutus) järjestelmillä, jolloin kylmäainetäytöstä saadaan pienennettyä merkittävästi (noin 90 %), ja lisäksi kylmäaine saadaan kiertämään huomattavasti lyhyemmissä putkissa, jolloin potentiaaliset vuotokohtat vähenevät. Välilliset järjestelmät ovat kuitenkin vastaavia suorita järjestelmiä kalliimpia. Putkistot ja jäähdytyskoneisto aiheuttavat sovelluksesta riippuen investointikustannuksiin tavallisesti 15–20 %:n lisän (Pedersen 1998, Harnisch & Hendriks 2000). Mikäli välillinen järjestelmä toteutetaan ammoniakilla tai hiilivedyillä, kasvavat investointikustannukset vastaavaan suoraan HFC-järjestelmään verrattuna arviolta 15–35 % (Pedersen 1998). Lisäksi energiankulutus kasvaa yleensä 10–20 % (ks. kohta 4.1.2) ja huoltokustannukset vastaavasti 20–30 % suoraan referenssijärjestelmään verrattuna (Pedersen 1998, Harnisch & Hendriks 2000, Kaappola 2001). Edellä mainitut lisäkustannusarviot suurille välillisille HFC- ja ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmille esitetään taulukossa 7.

Välillisissä jäähdytysjärjestelmissä joudutaan sekä meno- että paluuputket eristämään, mikä saattaa etenkin venttiiliryhmien kohdalla olla hankalaa (Kaappola 2001). Lisäksi käytettävät lämmönsiirtoaineet (esim. propyleeniglykoli) saattavat muodostaa kasvustoja vuotokohtiin.

Tulevaisuudessa hiilidioksidin käyttö kylmä- tai lämmönsiirtoaineena saattaa olla soveltuva ratkaisu suuriin kaupan kylmälaitoksiin esimerkiksi kaskadikoneistoissa (ks. kohta 4.1.2). Niissä korkeapainepuolella voidaan käyttää ammoniakia, propaania tai R-404A:ta ja matalapainepuolella hiilidioksidia. Tällaisia järjestelmiä on asennettu muun muassa Ruotsiin ja Sveitsiin (UNEP 1999a). Hiilidioksidin käytöstä tarvitaan kuitenkin vielä lisäkokemusta ja enemmän sille sopivia komponentteja, jotta laajempi kaupallistuminen on mahdollista (Kaappola 2001).

Joissakin tapauksissa suoraohyrystyslaitoksen korvaaminen hajautetulla järjestelmällä saattaa johtaa huomattaviin päästövähennyksiin. Hajautetussa toteutuksessa kylmäaineen määrää saadaan vähennettyä mahdollisesti jopa 75 % vastaavaan suoraohyrystyslaitokseen verrattuna ja lisäksi vuodot saattavat vähentyä oleellisesti (UNEP 1998b), (Little 1999).

Kylmäainevuotoja voidaan vähentää kohdassa 4.1.4.3 kuvatuilla päästöjen hallintaan ja parannettuun laitekonstruktion liittyvillä toimilla arviolta 40 %:a käytössä olevista ja 60 %:a uusista asennettavista laitoksista. Vuotojen vähentämisen lisäkustannusarviot esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Erilaisista päästövähennystoimenpiteistä aiheutuvat lisäkustannusarviot suurille kaupan kylmälaitoksille (Harnisch & Hendriks 2000, Pedersen 1998, Kaappola 2001).

järjestelmä -> toimenpide	lisäinvestoinnit [mk/t _{HFC}]	energian käytön kasvu	huoltokustannuslisä [mk/t _{HFC,a}]
suoraohyrystys -> välillinen; HFC	450 000–600 000	10–20 %	12 000–18 000
suoraohyrystys -> välillinen; ammoniakki tai hiilivedyt	450 000–750 000	10–20 %	12 000–18 000
suoraohyrystys -> vuotojen vähentäminen	60 000	0	30 000

Liitteessä E esitetään vaihtoehtoisilla jäähdytysmenetelmillä ja kylmäaineilla toteutettujen tyypillisten eurooppalaisten kaupan kylmälaitosten päästötasearvioita. Liitteen E esimerkkitapauksessa välillisellä tai hajautetulla jäähdytysjärjestelmällä saavutetaan nykytasoon nähden noin 30 %:n päästövähennys pakastuslämpötiloilla ja vastaavasti noin 50 %:n vähennys kylmälämpötiloilla. Sen sijaan välillisen HFC- ja ammoniakki-jäähdytysjärjestelmän päästötaseissa ei ole kovin merkittävää eroa. Esimerkkitaapauksessa suoraohyrystysjärjestelmän tiivistäminen ja vuotojen vähentäminen alentaa päästöjä noin 30–40 %. Tällöin jäähdytyksen välillisellä tai hajautetulla toteutuksella ei enää saavuteta suhteessa yhtä suurta päästövähennystä kuin referenssitilanteessa (liite E). On huomattava, että liitteen E taulukossa E-1 esitettävät oletukset eivät vastaa täysin Suomessa esiintyvää tilannetta. Poikkeamat esitetään liitteen E alaviitteissä.

4.1.6.4 Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset

Päästövähennystoimenpiteiksi valittiin joko suurten suoraohyrysteisten laitosten korvaaminen täysin välillisillä (jäähdytys ja lauhdutus) laitoksilla tai vuotojen vähentäminen.

Taulukko 8. Kaupan kylmälaitosten skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

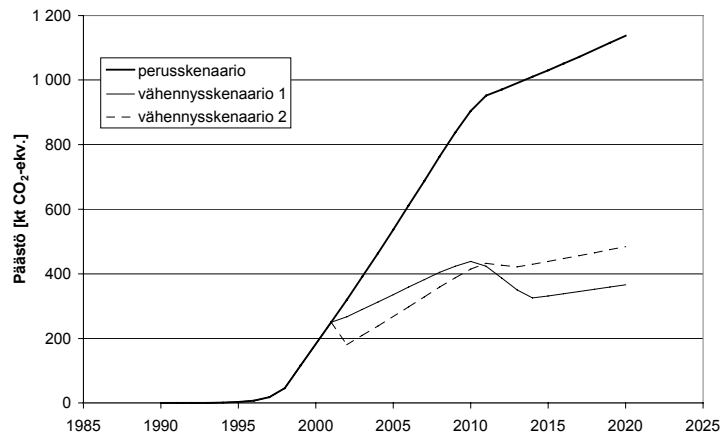
lähtöarvot ja oletukset	skenaario		
	perus	vähennys 1 (välilliset HFC- järjestelmät)	vähennys 2 (vuotojen vähentäminen)
asennetut uudet laitokset vuonna 1999	1 030 kpl		
uusiin laitoiksiin asennettu kylmäaineen kokonaismäärä vuonna 1999	100 283 kg		
uusiin laitoiksiin asennettavan kylmäainemäärän muutos 2000–2020	+ 2 %/a		+ 2 %/a
keskimääräinen HFC-kylmäainetäytös:			
- suuret laitokset	300 kg	30 kg	300 kg
- pienet ja keskisuuret laitokset	30 kg	30 kg	30 kg
uusiin laitoiksiin asennetut kylmäaineet vuonna 1999:			
- R-404A	98,2 %		
- R-134a	1,3 %		
- R-22	0,3 %		
- R-409 A ¹⁹	0,2 %		
uusiin laitoiksiin asennettavat kylmäaineet vuosina 2000–2020:			
- R-404A	100 %	100 %	100 %
päästökertoimet:			
- asennus	2 %	2 %	2 %
- käyttö	20 %	10–20 %	8–12 %
- käytöstäpoisto	15 %	12 %	12 %
laitteiden käyttöikä	12 a	12 a	12 a

Vähennysskenaariossa 1 oletettiin, että kaikki asennettavat suuret laitokset (noin 80 % kylmäaineen käytöstä) toteutetaan täysin välillisesti vuoden 2002 alusta alkaen. Kylmäaineena oletettiin käytettävän R-404A:ta. Pienempien laitosten toteutus ja päästöt arvioitiin pysyvän perusskenaarion mukaisina. Välillisten järjestelmien keskimääräiseksi kylmäainetäytökseksi oletettiin kymmenesosa vastaaviin suoriin järjestelmiin verrattuna (taulukko 8). Välillisten järjestelmien arvioitiin olevan 50 % suorahöyrystysjärjestelmiä tiiviimpiä, ja lisäksi kylmäaineen talteenoton katsottiin olevan helpompaa (taulukko 8). Laitosten sähköenergiankulutuksen oletettiin kasvavan 15 %²⁰ suoriin järjestelmiin verrattuna, joiden keskimääräisen vuotuisen sähkökulutuksen arvioitiin olevan 40 %:n huipunkäyttöajalla noin 2 000 MWh/t_{HFC}. Sähkön hinnaksi arvioitiin 40 p/kWh (ks. kohta 3.3.1) ja sähköntuotannon keskimääräiseksi päästökertoimeksi 250 g CO₂/kWh (ks. kohta 3.2.2).

Vähennysskenaariossa 2 oletettiin uusien laitteiden tiiviyyttä parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös paremmat huolto- ja käytönseurantatoimenpiteet ennakoitiin otettavan käyttöön koko laitoskannassa. Toimenpiteiden seurauksena laitosten käytön ja käytöstä poiston aikaisten päästöjen arvioitiin pienenevän taulukossa 8 esitetyille tasoille. Päästövähennysskenaariot 1 ja 2 esitetään kuvassa 5.

¹⁹ R-409A on HCFC-yhdisteistä koostuva CFC-12-laitoksille tarkoitettu huoltokylmäaine.

²⁰ Mikäli välillinen lauhdutus helpottaa lauhdutuslämmön hyötykäyttöä, saattaa esitetty energiankulutuksen kasvu olla liian suuri.



Kuva 5. Perus- sekä päästövähennysskenaariot 1 (suurten laitosten välilliset HFC-järjestelmät) ja 2 (vuotojen vähentäminen) kaupan kylmälaitosten HFC-päästöille.

Toteuttamalla vuodesta 2002 alkaen kaikki asennettavat suuret kaupan kylmälaitokset täysin välillisesti, saavutetaan Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella noin 50 %:n ja vuoden 2020 tasossa noin 70 %:n päästövähennys. Vuotojen vähentämisellä saavutetaan noin 55–60 %:n päästövähennys KIOTO 1:n ja vuoden 2020 tasossa. Taulukossa 9 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 9. Kaupan kylmälaitosten päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario 1 (välilliset HFC-järjestelmät)			vähennysskenaario 2 (vuotojen vähentäminen)		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-	0	-	-
2000	182	182	-	-	182	-	-
KIOTO 1	886	415 (351)*	1 080	255	404	300	69
2020	1 138	366 (265)*	2 080	170	484	530	46

* suluissa suorat kylmäainepäästöt

Välillisillä järjestelmillä saavutettavat päästövähennykset ja kustannustehokkuus riippuvat laitosten lisäenergiatarpeen ja sen tuotannossa syntyvien hiilidioksidipäästöjen lisäksi referenssijärjestelmien vuodoista. Välillisillä järjestelmillä arvioitiin saavutettavan noin 20–30 % alhaisempi päästötaso kuin vuotoja vähentämällä. Toisaalta vuotojen vähentäminen osoittautui selvästi kustannustehokkaammaksi vaihtoehdoksi (taulukko 9). On esitetty myös arvioita, joiden mukaan nykyaikaisten kaupan kylmälaitosten päästöt olisivat Suomessa ainoastaan noin 6 % vuodessa. Mikäli tämä asetetaan perusskenaarion tilanteeksi ja vähennysskenaarioiden käytön päästökertoimia alennetaan samassa suhteessa, nousevat päästövähennyskustannukset vähennys-

skenaariossa 1 noin 4- ja vähennysskenaariossa 2 noin 3-kertaisiksi. Molemmissa vähennysskenaarioissa saavutettaisiin tällöin Kioton ensimmäisen velvoitekauden jälkeen lähes yhtäläiset päästötasot (noin 170–190 kt CO₂-ekv.). Perusskenaarion päästötaso olisi tällöin KIOTO 1 -tasossa noin 290 ja vuoden 2020 tasossa noin 390 kt CO₂-ekv.

4.1.7 Elintarvike- ja prosessiteollisuuden kylmälaitokset

4.1.7.1 Yleistä

Teollisuuden kylmälaitokset aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 49 kt CO₂-ekvivalenttia uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka jakautuivat likimain tasan elintarvike- ja muun prosessiteollisuuden kesken (kuvat 6 ja 7). Aiheutunut päästömäärä vastasi noin 15 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,07 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Elintarviketeollisuudessa kylmälaitoksia käytetään ruoan valmistusprosessien tarvitsemaan jäädytykseen sekä ruoan säilytykseen ja pakastamiseen tavallisesti kylmävarastoissa. Näiden lisäksi jäädytystä tarvitaan lähes kaikessa muuntotyypisessä prosessiteollisuudessa, kuten kemian-, öljy-, kaasu-, metalli- ja muoviteollisuudessa. Tarvittavat jäädytyskapasiteetit poikkeavat paljon toisistaan ja vaihtelevat muutamasta kymmenestä kilowatista jopa useisiin megawatteihin (UNEP 1999a). Elintarviketeollisuudessa käytetyt jäädytyslämpötilat vaihtelevat yleensä hieman yli 0 °C:sta muutamaa kymmeneen pakkasasteeseen, kun prosessiteollisuudessa tarvittavat lämpötilat saattavat olla jopa alle -90 °C:n (UNEP 1999a).

Kylmähöyryprosessi on myös teollisuudessa vallitseva kylmätekniikka, vaikka absorptiotekniikkaa on ollut käytössä jo 1800-luvun loppupuolelta lähtien (UNEP 1998b, van Gerwen 2000). Käytössä on kaikenlaisia kylmäaineita, mutta ammoniakki²¹ ja HCFC-yhdisteet ovat selvästi yleisimmät (UNEP 1998b). Ammoniakilla on aina ollut merkittävä markkinaosuus juuri teollisuudessa (suurissa kylmälaitoksissa) johtuen sen hyvistä termodynaamisista ominaisuuksista ja kustannustehokkuudesta²². Hiilivedyillä on merkittävä markkinaosuus kylmäaineena sellaisilla teollisuuden aloilla, joissa käsitellään muutenkin palavia yhdisteitä

²¹ Ammoniakkia käytetään sekä absorptio- että kylmähöyryprosesseissa.

²² Teollisuudessa ammoniakki voidaan usein pitää helposti ihmisten ulottumattomissa ja sen turvallinen käyttö on suhteellisen helposti toteutettavissa.

(esimerkiksi kemianteollisuudessa). Keskisuuria ja pieniä käytössä olevia CFC- ja HCFC-yhdisteillä toimivia yksiköitä huolletaan nykyään vastaavilla kierrätetyillä yhdisteillä sekä niin sanotuilla huoltokylmäaineilla (ks. kohta 4.1.3 ja liite B, taulukko B-1). Osa näistä laitoksista on myös korvertoitu käyttämään HFC-kylmäaineita. Esimerkiksi CFC-12 on joissain tapauksissa korvattu HFC-134a:lla ja R-502 vastaavasti HFC-yhdisteiden seoksella R-404A tai R-507A (UNEP 1998b). Prosessien vedenjäähdytyskoneistoissa käytetään nykyään yleensä R-407C:tä, R-134a:ta tai ammoniakkia (suuret yksiköt) (Kaappola 2001).

4.1.7.2 Perusskenaariot

Suomessa asennettiin vuonna 1999 yhteensä noin 250 uutta elintarviketeollisuuden ja noin 350 muiden prosessien jäähdyttämiseen tarvittavaa kylmälaitosta. Prosessiteollisuuteen asennetuista HFC-kylmälaitoksista noin 40 % oli vedenjäähdytyskoneistoja ja 60 % suorahöyrysteisiä laitoksia. Teollisuuden kylmälaitosten skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit esitetään taulukossa 11.

Perusskenaarioissa oletettiin vuosittain käyttöön otettujen HFC-kylmäaineiden määrän olleen 0 % vuonna 1993 ja kasvaneen lineaarisesti vuoteen 1999. Vuosittain käyttöön otettavan kokonaiskylmäainemäärän ei oletettu muuttuvan vuoden 1999 tilanteesta. Myös HFC-kylmäaineiden suhteellisten osuuksien ennakoitiin pysyvän vakiona vuoden 1999 jälkeen. Elintarviketeollisuuden kylmälaitoksiin vuonna 1999 asennetun pienen määrän HCFC-kylmäaineita oletettiin korvautuvan R-404A:lla (taulukko 11). Elintarviketeollisuuden perusskenaario esitetään kuvassa 6 ja muun prosessiteollisuuden kuvassa 7.

4.1.7.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

HFC-yhdisteitä käytetään Suomessa tavallisesti pienissä ja keskisuurissa elintarviketeollisuuden kylmälaitoksissa sekä muiden prosessien jäähdytyksessä. Etenkin asutuskeskuksissa sijaitsevista pienistä elintarviketeollisuuden laitoksista on HFC-yhdisteiden korvaaminen palavilla tai myrkyllisillä kylmäaineilla hankalaa tai jopa mahdotonta (Kaappola 2001). Tällaisissa kohteissa suorat HFC-järjestelmät voidaan korvata täysin välillisillä (jäähdytys ja lauhdutus) HFC-järjestelmillä, jolloin kylmäainetäytöstä saadaan pienennettyä noin 90 % ja lisäksi potentiaaliset vuotokohdat vähenevät. Kohteissa, joissa myrkyllisen tai syttyvän kylmäaineen käyttö on toteutettavissa, voidaan käyttää ammoniakkia tai hiilivetyjä. Pienet ja keskisuuret välilliset järjestelmät ovat kuitenkin investoinneiltaan kalliita ja lisäksi ne nostavat

energiankulutusta ja suurentavat huoltokustannuksia suoriin referenssijärjestelmiin verrattuna. Lisäkustannusarviot esitetään taulukossa 10.

Prosessien vedenjäähdytyskoneistoissa HFC-kylmäaineen korvaaminen ammoniakilla tai hiilivedyillä on oletettavasti helpompaa kuin elintarviketeollisuuden laitoksissa. Koska vedenjäähdytyskoneistot ovat jäähdytysperiaatteeltaan välillisiä, ei palavien tai myrkyllisten kylmäaineiden käyttö yleensä edellytä ylimääräistä sekundääripiiriä. Sen sijaan kylmälaitteet ja konehuone on sijoitettava EN 378 -standardin mukaisesti. Hiilivedyt ja erityisesti ammoniakki ovat usein energiatehokkaampia vaihtoehtoja kuin HFC-yhdisteet, ellei HFC-järjestelmiä ole suunniteltu erityisen hyvin (UNEP 1998b). Ammoniakki- tai hiilivetykäyttöisten prosessien vedenjäähdytyskoneistojen lisäkustannusarviot vastaaviin HFC-järjestelmiin verrattuna esitetään taulukossa 10.

Prosessiteollisuudessa käytettävien suorahöyrysteisten laitosten HFC-kylmäaineen korvaamista muilla kylmäaineilla on hankala arvioida. Joissakin tapauksissa myrkyllisten tai palavien kylmäaineiden käyttö saattaa olla mahdollista suorissa järjestelmissä, mutta tällaisten käyttökohteiden osuuksista ei ole tietoa. Mikäli muutos edellyttää välillisen järjestelmän käyttöönottoa, kustannukset nousevat, ja vastaavasti lisääntyneen energiankulutuksen tuotannossa syntyvät päästöt alentavat saavutettavaa päästövähennemää.

Kylmäainevuotoja voidaan vähentää kohdassa 4.1.4.3 kuvatuilla päästöjen hallintaan ja paranettuun laitekonstruktioon liittyvillä toimilla arviolta 40 %:a käytössä olevista ja 60 %:a uusista asennettavista laitoksista. Vuotojen vähentämisen lisäkustannusarviot esitetään taulukossa 10.

Taulukko 10. Päästövähennyksen menetelmien lisäkustannusarvioita teollisille kylmälaitoksille (Harnisch & Hendriks 2000, Kaappola 2001).

järjestelmä -> toimenpide	lisäinvestoinnit [mk/t _{HFC}]	energian käytön kasvu	huoltokustannuslisä [mk/t _{HFC,a}]
elintarviketeollisuus: suora HFC -> välillinen HFC, NH ₃ tai hiilivety	400 000	15 %	18 000
muu prosessiteollisuus: välillinen HFC -> välillinen NH ₃ tai hiilivety	240 000	-5-0 %	12 000
elintarvike- ja muu prosessiteollisuus: suora tai välillinen HFC -> vuotojen vähentäminen	20 000	0	30 000

4.1.7.4 Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset

Elintarviketeollisuuden kylmälaitosten päästövähennysoimiksi valittiin joko suorien HFC-järjestelmien korvaaminen täysin välillisillä HFC-, ammoniakki ja hiilivetyjärjestelmillä tai vuotojen vähentäminen. Muun prosessiteollisuuden päästövähennys-

toimiksi valittiin joko vedenjäähdytyskoneistojen HFC-kylmäaineen korvaaminen ammoniakilla ja hiilivedyillä tai vastaavasti vuotojen vähentäminen. Vähennysskenaariot laadittiin erikseen elintarvike- ja muulle prosessiteollisuudelle.

Taulukko 11. Teollisuuden kylmlaitosten skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario		vähennysskenaario	
	elintarvike-teollisuus	muu prosessiteollisuus	teollisuus 1 ²³	teollisuus 2 ²⁴
asennetut uudet laitokset vuonna 1999	243 kpl	336		
uusiin laitoihin asennettu kylmäaineen kokonaismäärä vuonna 1999	56 791 kg	64 363 kg		
uusiin laitoihin asennettavan kylmäainemäärän muutos 2000–2020	+0 %/a	+0 %/a		
HFC-laitosten keskimääräinen täytös	80 kg			
uusiin laitoihin asennetut kylmäaineet vuonna 1999:				
- ammoniakki	73,3 %	72,1 %		
- R-404A	24,3 %	16,6 %		
- R-134a	1,4 %	8,4 %		
- R-22	0,8 %	-		
- R-407C	-	2,9 %		
- R-409 A	0,2 %	-		
uusiin laitoihin asennettavat kylmäaineet vuosina 2000–2020:				
- ammoniakki	73,3 %	72,1 %		
- R-404A	25,3 %	16,6 %		
- R-134a	1,4 %	8,4 %		
- R-407C	-	2,9 %		
päästökertoimet:				
- asennus	2 %	2 %	2 %	2 %
- käyttö	15 %	15 %	7,5–15 %	6–9 %
- käytöstäpoisto	15 %	15 %	5–15 %	12 %
laitteiden käyttöikä	15 a	15 a	15 a	15 a

Vähennysskenaariossa elintarviketeollisuus (E) 1 oletettiin, että perusskenaarion mukaan vuosittain asennettavista HFC-kylmlaitoksista 50 % korvataan täysin välillisillä HFC-laitoksilla ja 50 % täysin välillisillä ammoniakki- ja hiilivetykoneistoilla vuodesta 2002 eteenpäin. Keskimääräisen suoran referenssijärjestelmän (täytös 80 kg) vuotuisen energiankulutuksen asennettua kylmäainetäytöstä kohden oletettiin olevan 2 300 kWh/kg (Kaappola 2001). Välillisten järjestelmien lisäenergiantarpeen arvioitiin olevan taulukon 10 mukaisesti 15 %. Sähköntuotannon keskimääräisenä päästökertoimena käytettiin 250 g:aa CO₂/kWh (ks. kohta 3.2.2) ja sähkön hintana 40 p:ä/kWh (ks. kohta 3.3.1).

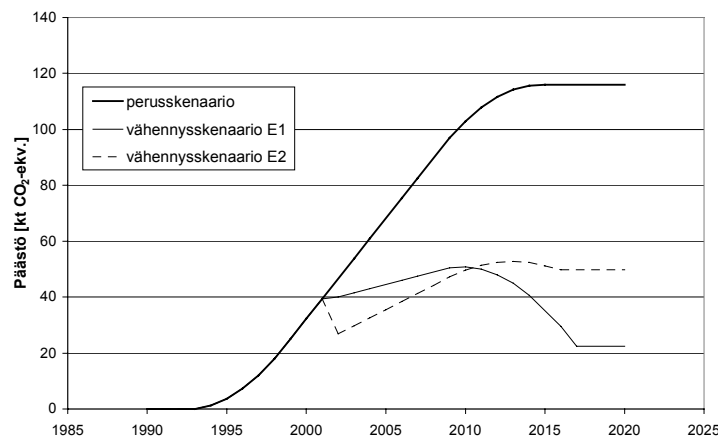
Vähennysskenaariossa muu prosessiteollisuus (M) 1 oletettiin, että perusskenaarion mukaan kaikkien vuosittain asennettavien vedenjäähdytyskoneistojen HFC-kylmäaine korvataan ammoniakilla tai hiilivedyillä vuodesta 2002 eteenpäin. Energiahyötysuhteen ei oletettu muuttuvan referenssijärjestelmiin verrattuna. Prosessiteollisuuteen

²³ Elintarviketeollisuus 1: välilliset HFC-, ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmät. Muu prosessiteollisuus 1: ammoniakki- tai hiilivetykäyttöiset vedenjäähdytyskoneistot

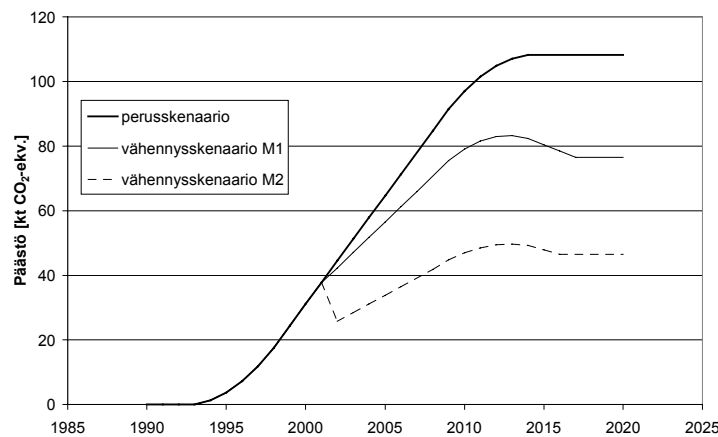
²⁴ Elintarvike- ja muu prosessiteollisuus 2: vuotojen vähentäminen

asennettavien suorien laitosten osuuksien ja päästöjen ennakoitiin pysyvän perusskenaarion tasolla.

Vähennysskenaariossa elintarviketeollisuus (E) 2 ja muu prosessiteollisuus (M) 2 oletettiin uusien laitosten tiiviyyttä parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös tehokkaampien huolto- ja käytönseurantatoimenpiteiden arvioitiin tulevan käyttöön koko laitospäästöissä. Toimenpiteiden seurauksena laitosten käytön ja käytöstäpoiston aikaisten päästöjen arvioitiin pienenevän taulukossa 11 esitetyille tasoille. Elintarviketeollisuuden päästövähennysskenaariot (E) 1 ja 2 esitetään kuvassa 6 ja muun prosessiteollisuuden (M) kuvassa 7.



Kuva 6. Perus- sekä päästövähennysskenaariot (E) 1 (välilliset HFC-, ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmät) ja (E) 2 (vuotojen vähentäminen) elintarviketeollisuuden kylmälaitoksille.



Kuva 7. Perus- sekä päästövähennysskenaariot (M) 1 (vedenjäähdyttimien ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmät) ja (M) 2 (vuotojen vähentäminen) muun prosessiteollisuuden kylmälaitoksille.

Elintarviketeollisuuden päästövähennysskenaariot (E) 1 ja E (2) ovat hyvin lähellä toisiaan Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella, jolloin saavutettava päästövähennemä on kummassakin tapauksessa noin 50 %. Sen sijaan vuonna 2020 skenaariossa (E) 1 saavutetaan noin 80 %:n ja skenaariossa E (2) noin 60 %:n päästövähennemä perusskenaarioon nähden.

Prosessiteollisuuden vedenjäähdyttimien kylmäaineen vaihdolla saavutetaan arviolta 100 %:n päästövähennemä perusskenaarion tasoon nähden. Koska perusskenaarion mukaan asennettaville suorahöyrysteisille järjestelmille ei esitetty kylmäaineen vaihtoon tai välillisen järjestelmän käyttöönottamiseen liittyvää skenaariota, on pelkkien vedenjäähdyttimien kylmäaineen vaihdolla saavutettava päästövähennemä noin 20 % Kioton ensimmäisen velvoitekauden ja noin 30 % vuoden 2020 tasossa (kuva 7). Mikäli perusskenaarion mukaan asennettavia suoria HFC-järjestelmiä voidaan merkittävästi korvata suorilla ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmillä, on saavutettava suhteellinen päästövähennemä arvioitua suurempi. Skenaariossa M2 saavutetaan vastaavanlaiset suhteelliset päästövähennemät kuin elintarviketeollisuuden skenaariossa E2. Taulukoissa 12 ja 13 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 12. Elintarviketeollisuuden kylmälaitosten päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario (E) 1 (välilliset HFC-, NH ₃ - tai HC-järjestelmät)			vähennysskenaario (E) 2 (vuotojen vähentäminen)		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-	0	-	-
2000	32	32	-	-	32	-	-
KIOTO 1	102	50 (38)	160	348	49	40	83
2020	116	22 (3)	330	227	50	70	51

Taulukko 13. Muun prosessiteollisuuden kylmälaitosten päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario (M) 1 (vedenjäähdyttimien NH ₃ - tai HC-järjestelmät)			vähennysskenaario (M) 2 (vuotojen vähentäminen)		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-	0	-	-
2000	31	31	-	-	31	-	-
KIOTO 1	96	78	20	94	46	52	106
2020	108	76	32	66	47	88	65

4.1.8 Jääradat

4.1.8.1 Yleistä

Tekojääratojen kylmälaitokset aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä arviolta noin 3 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 8) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 1 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,004 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Suomessa oli 6.7.1999 käytössä yhteensä 226 jäähallia (163) ja ulkotekojäärataa (Suomen Jääkiekkoliitto ry 2001). Jäähalleissa oli tuolloin yhteensä 188²⁵ jäärataa, joten tekojääratoja oli kaikkiaan 251 kappaletta. Jäähalleja on etenkin 1990-luvulla rakennettu suhteellisen nopealla tahdilla. Tällä hetkellä lukumäärä lisääntyy vuosittain noin 10–15 hallilla. Vuosien 2000–2001 vaihteessa suunnitteilla tai rakenteilla olevia hallihankkeita oli Suomen Jääkiekkoliitto ry:n mukaan 43 kappaletta, joista viisi oli ulkotekojääradan kattamis- ja kaksi hallin saneeraushankkeita (SKLL & SKY 2000, sivu 29).

Tekojääratojen kylmäaineena on perinteisesti käytetty HCFC-22:ta ja ammoniakkaa pääasiassa suorissa jäähdytysjärjestelmissä (Aittomäki et al. 1992). Tällaisten järjestelmien kylmäainetäytös on ammoniakilla toteutettuna noin 2 tonnia ja R-22:lla noin 3–4 tonnia (Aittomäki et al. 1992). Viimeiset suorat jäähdytysjärjestelmät rakennettiin 1990-luvun alussa, jonka jälkeen on asennettu ainoastaan välillisiä jäähdytysjärjestelmiä (Kaappola 2001). Uusissa asennettavissa laitoksissa kylmäaineena käytetään R-404A:ta tai ammoniakkaa. Lauhdutus toteutetaan joko suoralla tai välillisellä periaatteella. Kylmäainetäytös on murto-osa vastaaviin suoraohyrysteisiin järjestelmiin verrattuna ja vaihtelee muutamista kymmenistä kilogrammoista satoihin kilogrammoihin riippuen muun muassa lauhdutuksen toteutusperiaatteesta (Kaappola 2001).

4.1.8.2 Perusskenaario

Toiminnanharjoittajien vähäisyydestä johtuen vuonna 1999 asennettujen jääratojen kylmälaitosten kylmäaineiden (R-404A tai NH₃) jakauma, keskimääräiset täytökset ja asennettujen laitosten tarkka lukumäärä ovat luottamuksellisia eikä niitä tässä työssä esitetä eriteltyinä.

²⁵ Joissakin halleissa on 2 tai 3 jäärataa (Suomen Jääkiekkoliitto ry 2001), joiden jäähdytysenergiantarve tuotetaan usein keskitetysti yhdellä kylmälaitoksella.

Perusskenaariossa oletettiin, että vuosittain asennetaan 10–15 kylmlaitosta. R-404A:n käytön arvioitiin lisääntyneen lineaarisesti vuodesta 1993 (0 %) vuoden 1999 (100 %) kyselyaineistoa (SYKE 2000a) vastaavaan määrään. Ammoniakin ja R-404A:n markkinaosuuksien arvioitiin pysyvän vakiona koko tulevan tarkastelukauden. Perusskenaarion laadinnassa käytetyt päästökertoimet esitetään taulukossa 14 ja HFC-kylmäainepäästöjen perusskenaario kuvassa 8.

4.1.8.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Uudet asennettavat R-404A-järjestelmät voidaan todennäköisesti teknisesti korvata ammoniakkikoneistoilla kaikissa tapauksissa. Etenkin välillistä lauhdutusta käyttämällä myrkyllisen ammoniakin täytös saadaan pieneksi, jolloin riittävät turvallisuustoimet ovat toteutettavissa suhteellisen pienillä lisäkustannuksilla.

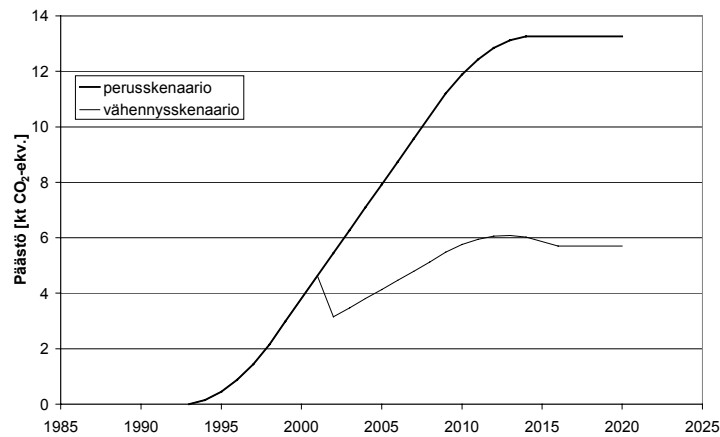
Kylmäainevuotoja voidaan vähentää kohdassa 4.1.4.3 kuvatuilla päästöjen hallintaan ja parannettuun laitekonstruktioon liittyvillä toimilla arviolta 40 %:a käytössä olevista ja 60 %:a uusista asennettavista laitoksista. Vuotojen vähentämisen lisäkustannusarvioina voidaan kohtuullisen tarkkaan soveltaa prosessiteollisuudelle taulukossa 10 esitettyjä arvioita.

4.1.8.4 Päästövähennysskenaario ja -kustannukset

Tekojääratiojen päästövähennysmenetelmäksi valittiin vuotojen vähentäminen. Vähennysskenaariossa oletettiin uusien laitosten tiiviyyttä parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös tehokkaampien huolto- ja käytönseurantatoimenpiteiden arvioitiin tulevan käyttöön koko laitospöytä. Toimenpiteiden seurauksena laitosten käytön ja käytöstäpoiston aikaisten päästöjen arvioitiin pienenevän taulukossa 14 esitetyille tasoille. Päästövähennysskenaario esitetään kuvassa 8.

Taulukko 14. Tekojääratiojen skenaarioiden laadinnassa käytetyt keskeisimmät oletukset.

oletukset	perusskenaario	vähennysskenaario
vuosittain asennettavat laitokset	10–15 kpl	10–15 kpl
asennettavat kylmäaineet 1999–2020		
- R-404A	vakio	vakio
- R-717 (ammoniikki)	vakio	vakio
päästökertoimet:		
- asennus	2 %	2 %
- käyttö	15 %	6–9 %
- käytöstäpoisto	15 %	12 %
laitosten käyttöikä	15 a	15 a



Kuva 8. Tekojäätöiden R-404A-kylmäainepäästöjen perus- ja päästövähennysskenaario (vuotojen vähentäminen).

Koska perusskenaarion päästöt pysyvät verrattain alhaisella tasolla, on myös saavutettava absoluuttinen päästövähennys suhteellisen pieni. Tekojäätöiden kylmälaitosten kylmäainevuotoja vähentämällä on saavutettava päästövähennys Kioto-ensimmäisellä velvoitekaudella arviolta 6 kt CO₂-ekv. ja vuonna 2020 noin 8 kt CO₂-ekv. (kuva 8). Taulukossa 15 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 15. Tekojäätöiden R-404A päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioto-ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset	
			[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-
2000	4	4	-	-
KIOTO 1	12	6	< 10	81
2020	13	6	10	49

4.1.9 Ammattikeittiöiden kylmlaitokset ja omakoneelliset kylmäkalusteet

4.1.9.1 Yleistä

Ammattikeittiöiden kylmlaitokset ja omakoneelliset kylmäkalusteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 5 kt CO₂-ekvivalenttia (kuvat 9 ja 10) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 2 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,007 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Suomessa oli A. C. Nielsen Oy:n ylläpitämän suurkeittiörekisterin mukaan vuonna 1997 yhteensä 21 291 suur- eli ammattikeittiötä, joissa valmistetaan noin 700 miljoonaa ateriala vuositain (Salminen et al. 1998). Ammattikeittiöt koostuvat erilaisista ruoan valmistus- ja kuumennuskeittiöistä sekä keskus-, komponentti- ja jakelukeittiöistä. Niitä on muun muassa päiväkodeissa, kouluissa, erilaisissa ravintoloissa, sairaaloissa ja varuskunnissa. Ammattikeittiöiden yhteenlaskettu energiankulutus on tällä hetkellä noin 600 GWh vuodessa (Motiva 2001). Kylmäsäilytyksen- ja -käsittelyn osuus energiankulutuksesta vaihtelee tutkimuksien mukaan keittiön tyypistä riippuen 12 ja 60 %:n välillä (Salminen et al. 1998). Koska ruoanvalmistus ja keittiölaitteet tuottavat paljon lämpöä, on hyvin suunniteltu ilmastointi jäähdytyksineen myös keskeisessä osassa. Kiinteät ilmastoinnin jäähdytyslaitteet käsitellään kuitenkin erikseen kohdassa 4.1.11.

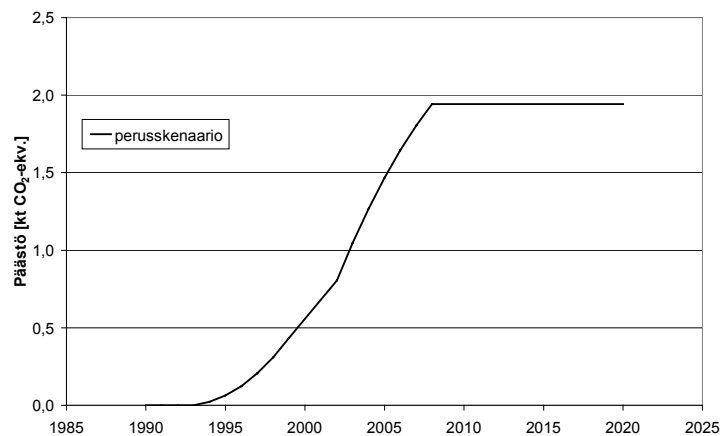
Ammattikeittiöissä erilaisille raaka-aineille ja valmiille ruoille on yleensä erilliset, oikeaan lämpötilaan säädetyt kylmäsäilytystilat, jotka koostuvat erilaisista kylmlaitoksista (kylmä- ja pakastehuoneista) ja omakoneellisista kylmlaitteista (kylmä-, jäähdytys-, pakaste- ja pakastuskaapeista sekä kylmä- ja pakastealtaista). Kylmlaitteet voidaan asentaa myös keskitettyyn kylmäkoneistoon. Tällöin yksi tai yleensä muutama kylmlaitos tuottaa jäähdytysenergian koko ammattikeittiön kylmäkalustoon. Kylmäaineina on perinteisesti käytetty CFC- ja HCFC-yhdisteitä, kuten R-12:ta ja R-502:ta, joita on osittain korvattu HCFC- ja HFC-yhdisteistä sekä hiilivedyistä koostuvilla huoltokylmäaineilla (ks. liite B, taulukko B-1). Uusissa asennettavissa järjestelmissä on otettu käyttöön HFC-kylmäaineet R-134a ja R-404A.

4.1.9.2 Perusskenaariot

Suomessa asennettiin vuonna 1999 noin 300 ammattikeittiöiden käyttöön tarkoitettua kylmlaitosta. Omakoneellisia kylmäkalusteita otettiin käyttöön useita tuhansia kappaleita. Lukumäärään sisältyvät myös pienet kaupalliset kylmlaitteet (esimerkiksi huoltoasemien ja kioskien esittelykaapit ja -altaat, baarien ja ravintoloiden jääpalakoneet sekä lähdevesiautomaatit) sekä lääke- ja laboratoriojääkaapit ja

-pakastimet, koska näiden erottaminen on hankalaa. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten ja omakoneellisten kylmäkalusteiden perusskenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit esitetään taulukossa 16.

Perusskenaarioissa oletettiin HFC-kylmäaineen käytön kasvaneen lineaarisesti vuodesta 1993 (0 %) vuoteen 1999. Käyttöön otettavien laitosten ja kalusteiden luku- sekä kylmäainemäärissä ja -tyypeissä ei arvioitu tapahtuvan muutoksia vuosina 2000–2020. Omakoneellisten kylmäkalusteiden käytönaikaiset päästöt arvioitiin suhteessa selvästi pienemmiksi kuin tyypillisesti pidempiä putkia sisältävien kylmälaitosten (vrt. esim. kodinkylmälaitteet ja kaupan kylmälaitokset). Omakoneellisten kylmäkalusteiden käytöstäpoiston yhteydessä tehtävällä kylmäaineen talteenotolla oletettiin puolestaan olevan hieman alhaisempi hyötysuhde kuin laitosten kohdalla (taulukko 16). Kalusteiden käyttöiän arvioitiin myös olevan lyhyempi (taulukko 16). Omakoneellisten kylmäkalusteiden HFC-kylmäainepäästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 9 ja ammattikeittiöiden kylmälaitosten kuvassa 10.



Kuva 9. Omakoneellisten kylmäkalusteiden HFC-kylmäainepäästöjen perusskenaario.

Molemmissa perusskenaariossa (kuvat 9 ja 10) päästöt kasvavat jyrkästi, kunnes HFC-kylmäaineen määrä laitekannassa saavuttaa maksimiarvonsa. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten päästöt kasvavat vielä loivasti koko Kioton ensimmäisen velvoitekauden ajan, jolloin niiden keskimääräinen päästö on arviolta 19 kt CO₂-ekv. Tämän jälkeen päästöt tasaantuvat vakiotasolle ja ovat vuonna 2020 noin 20 kt CO₂-ekv. Omakoneellisten kylmäkalusteiden päästöt saavuttavat maksimiarvonsa jo Kioton ensimmäisen velvoitekauden alussa, jonka jälkeen päästöt vuositasolla ovat noin 2 kt CO₂-ekv.

4.1.9.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Ammattikeittiöille suositellaan nykyään keskuskoneistolla (ks. kohta 4.1.6.1) varustettuja kylmäkalusteita, joissa on mahdollisuus myös lämmön talteenottoon (Heinonen et al. 1999). Keskuskoneiston kompressorit ja lauhduttimet sijoitetaan yleensä keittiön ulkopuolelle melun ja lauhdelämmön välttämiseksi työskentelytiloissa. Mikäli keittiössä käytetään erillisiä koneellisia kylmälaitteita, tulee lauhdelämpö siirtää pois keittiötilasta erillisellä jäähdytyspiirillä (vrt. hajautettu toteutus kohdassa 4.1.6.1). Toteuttamalla keskitetty jäähdytysenergian jakelu täysin välillisellä järjestelmällä (jäähdytys ja lauhdutus), saadaan kylmäainetäytöstä pienennettyä tavallisesti noin kymmenesosaan vastaavaan suoraohrystystoteutukseen verrattuna. Tällöin suurissa laitoksissa voidaan kylmäaineena todennäköisesti käyttää ammoniakkaa tai hiilivetyjä, mutta pienissä yksiköissä joudutaan käyttämään HFC-kylmäaineita (Kaappola 2001).

Karkean arvion mukaan uusista laitoksista noin 20–25 % voitaisiin toteuttaa ammoniakki- tai hiilivetykoneistoilla, mikäli konehuoneen sijoitus huomioitaisiin jo suunnitteluvaiheessa (Kaappola 2001). Käytössä olevissa yksiköissä tämä osuus on pienempi. Ammattikeittiöissä tarvitaan kuitenkin yleensä useita erilaisia lämpötilatasoja, jotka hankaloittavat välillisen jäähdytysjärjestelmän soveltuvuutta ja tehokasta käyttöä.

Kylmäainevuotoja voidaan vähentää kohdassa 4.1.4.3 kuvatuilla päästöjen hallintaan ja paranettuun laitekonstruktioon liittyvillä toimilla arviolta 40 %:a käytössä olevista ja 60 %:a uusista asennettavista laitoksista. Vuotojen vähentämisen lisäkustannusarvioiksi voidaan kohtuullisen tarkkaan soveltaa elintarviketeollisuuden kylmälaitoksille taulukossa 10 esitettyjä arvioita.

Pienten omakoneellisten kylmäkalusteiden kylmäaineena voidaan yleensä turvallisesti käyttää hiilivetyjä (vrt. kodinkylmälaitteet kohdassa 4.1.5). Suurempia kylmäainetäytöksiä vaativien laitteiden jäähdytyksen jakelu tulee puolestaan olla välillinen, mikäli kylmäaineena käytetään palavia yhdisteitä. Tällöin energiahyötysuhde huononee referenssijärjestelmään verrattuna. Pieniin omakoneellisiin kylmäkalusteisiin voidaan oletettavasti soveltaa hyvin samantyyppisiä päästövähennysmenetelmiä ja kustannusarvioita kuin kodin kylmälaitteisiin. Vuosittain käyttöön otettavien laitteiden kokojakaumaa ei kuitenkaan ollut tiedossa. Lisäksi keskusjärjestelmien lisääminen vähentää ammattikeittiöissä käytettävien omakoneellisten kalusteiden lukumäärää.

4.1.9.4 Päästövähennysskenaariot ja -kustannukset

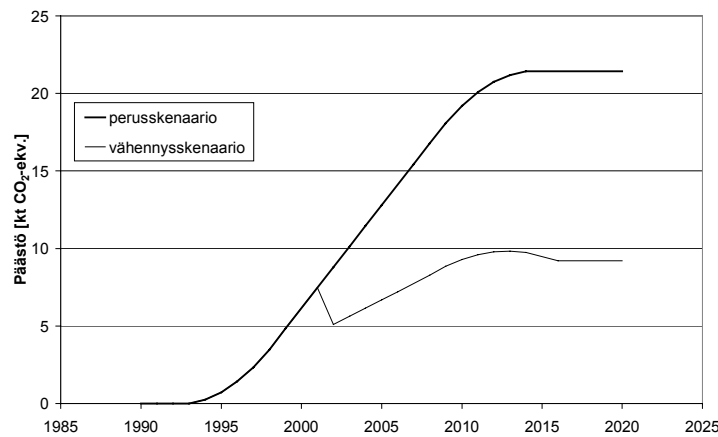
Ammattikeittiöiden kylmälaitosten päästövähennysmenetelmäksi valittiin vuotojen vähentäminen. Koska omakoneellisten kylmälaitteiden kylmäainepäästöjen merkitys ja vähennyspotentiaali on pieni ja lisäksi päästövähennysten laskeminen käytössä olevan tiedon perusteella on hankalaa, ei tässä työssä esitetä järjestelmien päästövähennysskenaariota. Myös keskuskoneistojen välilliset jäähdytysjärjestelmät sivuutetaan päästövähennysskenaarioista.

Taulukko 16. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten ja omakoneellisten kylmäkalusteiden skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

	ammattikeittiöiden kylmälaitokset		omakoneelliset kylmäkalusteet
	perusskenaario	vähennysskenaario	perusskenaario
lähtöarvot ja oletukset			
asennetut uudet laitokset (laitteet) vuonna 1999	336 kpl		(n. 8 300) ²⁶
uusiin laitoksiin (laitteisiin) asennettu kylmäaineen kokonaismäärä vuonna 1999	3 067 kg		2 500 kg
uusiin laitoksiin (laitteisiin) asennettavan kylmäainemäärän muutos 2000–2020	+ 0 %/a	+ 0 %/a	+ 0 %/a
keskimääräinen täytös	9,1 kg	9,1 kg	(n. 0,3 kg)
uusiin laitoksiin (laitteisiin) asennetut kylmäaineet vuonna 1999:			
- R-404A	80,9 %		18,0 %
- R-134a	19,1 %		82,0 %
uusiin laitoksiin (laitteisiin) asennettavat kylmäaineet vuosina 2000–2020:			
- R-404A	80,9 %	80,9 %	18,0 %
- R-134a	19,1 %	19,1 %	82,0 %
päästökertoimet:			
- asennus	2 %	2 %	2 %
- käyttö	15 %	6–9 %	3 %
- käytöstäpoisto	15 %	12 %	20 %
laitosten (laitteiden) käyttöikä	15 a	15 a	10 a

Ammattikeittiöiden kylmälaitosten päästövähennysskenaariossa oletettiin uusien asennettavien laitosten tiiviyyttä parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös tehokkaampien huoltotoimenpiteiden arvioitiin tulevan käyttöön koko laitoskannassa. Toimenpiteistä johtuen laitosten käytönaikaisten päästöjen arvioitiin pienenevän taulukossa 16 esitetyille tasoille. Tehokkaampien huoltokäytäntöjen ennakoitiin myös parantavan kylmäaineen talteenoton hyötysuhdetta (taulukko 16). Ammattikeittiöiden kylmälaitosten päästövähennysskenaario esitetään kuvassa 10.

²⁶ Käyttöön otettujen laitteiden lukumäärää ei ollut tiedossa. Luku on saatu olettamalla laitteiden keskimääräiseksi täytökseksi 0,3 kg (ks. taulukko 16).



Kuva 10. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten HFC-kylmäainepäästöjen perus- ja päästövähenysskenaario (vuotojen vähentäminen).

Koska perusskenaarion päästöt pysyvät verrattain alhaisella tasolla, myös saavutettava absoluuttinen päästövähennys on suhteellisen pieni. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten kylmäainevuotoja vähentämällä on saavutettava päästövähennys Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella arviolta 10 kt CO₂-ekv. ja vuonna 2020 noin 12 kt CO₂-ekv. (kuva 10). Taulukossa 17 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 17. Ammattikeittiöiden kylmälaitosten ja omakoneellisten kylmäkalusteiden päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	omakoneelliset kylmäkalusteet	ammattikeittiöiden kylmälaitokset			
	perusskenaario	perusskenaario	vähennysskenaario		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk] [mk/t CO ₂ -ekv.]	
1990	0	0	0	-	-
2000	1	6	6	-	-
KIOTO 1	2	19	9	< 10	91
2020	2	21	9	20	56

4.1.10 Kylmäkuljetuslaitteet

4.1.10.1 Yleistä

Kylmäkuljetuslaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 16 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 11) uusien kasviuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 5 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,02 %:a Suomen kaikkien

Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Kylmäkuljetuslaitteisiin luetaan kuuluviksi jäähdytettyjen tai jäädytettyjen tuotteiden kuljettamiseen tarvittavat laitteistot, joita käytetään muun muassa laivoissa, konteissa, junavaunuissa ja maantiekuljetuskalustoissa. Kuljetuksissa kylmälaitteet altistuvat monille tekijöille (esimerkiksi värinä), jotka aiheuttavat rasituksia kylmäjärjestelmään. Vaikka laitteet suunnitellaan paremmin kuin kiinteät kylmälaitteet, ovat käytön aikaiset vuodot yleensä korkeita. Kylmäjärjestelmien ja -aineiden tulee täyttää useita vaatimuksia ja standardeja, joissa huomioidaan turvallisuustekijöiden lisäksi muun muassa erilaisten ilmastollisten olosuhteiden vaikutus tarvittavaan jäähdytystehoon.

Maailmanlaajuisesti suurin osa jäähdytysaluksista toimii edelleen HCFC-22-kylmäaineella (UNEP 1998b), jonka käyttöä on korvattu uusissa laitteissa R-404A:lla ja R-407C:llä (UNEP 1999a). Tulevaisuudessa R-410A:n odotetaan dominoivan markkinoita tällä sektorilla (UNEP 1999a). Jäähdytysalusten tyypillinen täytös on 3–5 tonnia suorahöyrystys- ja 0,5–1 tonnia välillisissä järjestelmissä (UNEP 1998b). Jäähdytyskonteista noin 50 %:n arvioidaan edelleen toimivan CFC-12-kylmäaineella, joka on kuitenkin korvautumassa HFC-134a:lla. Jäähdytyskonttien tyypillinen täytös on noin 5–7 kg (UNEP 1998b, Öko-Recherche 1996).

Jäähdytetyissä junavaunuissa on tyypillisesti kaksi jäähdytysyksikköä ja noin 15 kg:n kylmäainetäytös. Kylmäaineena käytetään pääasiassa CFC-12:ta, joka on korvautumassa HFC-134a:lla (UNEP 1998b). Maantiekylmäkuljetuksissa (pääasiassa kuorma-autot) kylmäaineena on perinteisesti käytetty R-12:ta ja R-502:a, joita on korvattu R-22:lla, R-134a:lla ja R-404A:lla²⁷ (UNEP 1998b). Keskimääräinen täytös on yleensä 3–8 kg (IPCC 2000).

4.1.10.2 Perusskenaario

Suomessa asennettiin vuonna 1999 yhteensä 700 uutta kylmäkuljetuslaitetta. Kaikki laitteet asennettiin kuorma-autoihin. Muuntyyppisen kaluston, kuten jäähdytysalusten, konttien tai jäähdytettyjen junavaunujen, käytöstä Suomessa ei ollut tietoa saatavana. Kylmäkuljetuksia suorittavien kuorma-autojen kylmäainepäästöjen skenaarioiden keskeisimmät parametrit esitetään taulukossa 18.

²⁷ Suomessa on vuosista 1996–1997 asti ollut autojen koritilojen uusien kylmälaitteiden kylmäaineena ollut lähes pelkästään R-404A (diesikäyttöiset laitteet) ja R-134a (pienet ajokäyttöiset laitteet) (Hakala 2001).

Suomessa kylmäkuljetuslaitteisiin asennetun HFC-kylmäaineen käytön katsottiin alkaneen vuonna 1993. Asennettavien HFC-laitteiden määrän arvioitiin kasvaneen 60 %/a vuoteen 1999 asti, jolloin kaikkien asennettavien laitteiden oletettiin toimivan HFC-kylmäaineella (taulukko 18). Vuodesta 2000 eteenpäin vuosittain käyttöön otettavien laitteiden määrän arvioitiin pysyvän vakiona ja kaiken asennettavan kylmäaineen oletetaan olevan R-404A:ta vuoden 1999 tietojen mukaisesti (taulukko 18). Kylmäkuljetuslaitteiden kylmäainepäästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 11.

4.1.10.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Kylmäkuljetuslaitteissa käytettävien halogenoitujen hiilivetyjen korvaaminen muilla vaihtoehdoilla on hankalaa. Kylmäaine ei saisi missään tilanteessa olla myrkyllinen tai syttyvä, mikäli se pääsee vuotamaan järjestelmästä. Lisäksi kylmäaineen ja järjestelmän tulee pystyä antamaan riittävä kylmäteho kaikissa ilmastollisissa olosuhteissa, joissa laite käyttökänsä aikana toimii.

Kylmäkuljetuslaitteiden halogenoiduille hiilivedyille on esitetty vaihtoehtoiksi muun muassa hiilivetyjä, ammoniakkaa, hiilidioksidia tai typpeä (UNEP 1999a), (EPA 2000). Ammoniakin ja hiilivetyjen käyttö ei kuitenkaan turvallisuussyistä ole monissakaan sovelluksissa mahdollista tai sallittua. Hiilidioksidin ja typen käyttö sekä aurinko- ja kryogeniikkatekniikka ovat potentiaalisia tulevaisuuden vaihtoehtoja kylmäkuljetuslaitteisiin (EPA 2000, van Gerwen 2000). Niiden sovellettavuudesta, teknisestä kypsytydestä tai kustannuksista ei kuitenkaan ollut tietoa saatavilla.

Tällä hetkellä merkittävimmät tunnetut päästövähennysmenetelmät ovat tiiviimpien laitteiden käyttöönotto sekä kylmäaineen talteenotto huollon ja käytöstäpoiston aikana. Arviolta 40 %:n päästövähennys on saavutettavissa 5 %:n (75 000 mk/t_{HFC}) investointi- ja 50 %:n (30 000 mk/t_{HFC}) huoltokustannuslisällä (Harnisch & Hendriks 2000).

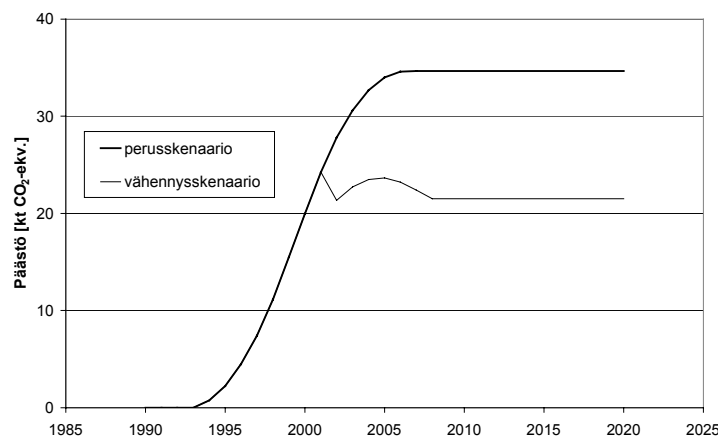
4.1.10.4 Päästövähennyskenaario ja -kustannukset

Kylmäkuljetuslaitteiden päästövähennystoimeksi valittiin vuotojen vähentäminen tiiviimpien laitteiden ja huoltokäytäntöjen tehostamisen avulla. Uusien laitteiden tiiviyttä oletettiin parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös paremmat huoltokäytännöt oletettiin otettavan käyttöön koko laitekannassa. Tiiviiden parantamisen oletettiin vähentävän uusien laitteiden käytön aikaisia päästöjä 20 % (taulukko 18). Lisäksi parempien huoltokäytäntöjen arvioitiin vähentävän sekä olemassa

olevien että uusien laitteiden käytön ja käytöstäpoiston aikaisia päästöjä myös 20 % (taulukko 18). Kylmäkuljetuslaitteiden päästövähennysskenaario esitetään kuvassa 11.

Taulukko 18. Kylmäkuljetuslaitteiden skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario	vähennysskenaario
asennetut uudet laitteet vuonna 1999	700 kpl	
uusien asennettujen laitteiden lukumäärän muutos 1993–1999	+ 60 %/a	
keskimääräinen täytös	6 kg	6 kg
uusien asennettavien laitteiden lukumäärän muutos 2000–2020	+ 0 %/a	+ 0 %/a
uusiin laitteisiin asennetut kylmäaineet vuonna 1999: - R-404A	100 %	
uusiin laitteisiin asennettavat kylmäaineet vuosina 2000–2020: - R-404A	100 %	100 %
päästökertoimet: - asennus - käyttö - käytöstäpoisto	0,6 % 32,5 % 25 %	0,6 % 19,5–26 % 20 %
laitteiden käyttöikä	7 a	7 a



Kuva 11. Kylmäkuljetuslaitteiden R-404A-kylmäainepäästöjen perus- ja päästövähennysskenaario (vuotojen vähentäminen).

Kylmäkuljetuslaitteille oletetun lyhyen käyttöiän vuoksi kylmäaineiden korvautuminen otsonia heikentävistä yhdisteistä HFC-yhdisteisiin tapahtuu perusskenaariossa verrattain nopeasti. Kylmäainepäästöjen arvioitiin tasaantuvan jo Kioton ensimmäiseen velvoitekauteen mennessä. Vuotojen vähentämisellä saavutetaan arviolta 35 %:n päästövähenemä sekä KIOTO 1:n että vuoden 2020 tasossa. Taulukossa 19 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkastelu vuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 19. Kylmäkuljetuslaitteiden R-404A-päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk]	kustannukset [mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-
2000	20	20	-	-
KIOTO 1	35	22	< 10	51
2020	35	22	10	34

4.1.11 Kiinteät ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät

4.1.11.1 Yleistä

Kiinteät ilmastoinnin jäähdytyslaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 7 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 12) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 2 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,01 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Nykyään rakennusten koneellinen ilmanvaihto on (lähes) pakollista teollistuneissa valtioissa. Se käsittää tavallisesti sisään otettavan ilman suodatuksen, kosteuden poiston ja lämpötilan käsittelyn. Tietokoneiden lisääntyvän käytön ja niiden luovuttaman ylimääräisen lämmön myötä etenkin erilaisten liike- ja julkisten rakennusten ilman jäähdytystarve on lisääntynyt runsaasti ja on monissa tapauksissa ympärivuotista myös Suomessa. Vuonna 1997 liike- ja julkisten rakennusten rakennuskannasta (n. 397 milj. m³) noin 6 % (24 milj. m³) oli jäähdytettyjä (Sipilä 2001). Kiinteistöjen jäähdytyksen huipunkäyttöaika Suomessa on noin 500–700 tuntia vuodessa (Koljonen & Sipilä 1998) ja jäähdytystehon tarve koko rakennuskannalle on noin 15–25 W/m³ mitoitussuhteella + 28 °C (Sipilä 2001). Asuinrakennukset eivät yleensä ole jäähdytettyjä.

Jäähdytys voidaan aikaansaada erilaisten²⁸ yksikkö- tai keskusjärjestelmien avulla. Jäähdytys ja lauhdutus toteutetaan joko suorana tai välillisenä. Yksikköjärjestelmät soveltuvat pienten tilojen tai yksittäisten huoneiden jäähdyttämiseen. Suurempien tilojen jäähdytys on perinteisesti toteutettu useilla erillisillä yksiköillä tai keskusjärjestelmillä.

²⁸ Ilmastoinnin jäähdytyskoneita ovat muun muassa ikkunakoneet, siirrettävät jäähdytyslaitteet, split (jaetut) -järjestelmät, kaappi- ja vakioilmastointikoneet, tuloilmakoneen jäähdytyskoneistot ja vedenjäähdytyskoneet (Kaappola 1989)

Jäähdytyskapasiteetiltaan 2–420 kW:n ilmalauhdutteiset järjestelmät kattavat valtaosan tämän hetken ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden maailman markkinoista (UNEP 1999a). Laitteiden keskimääräinen kylmäainetäytös jäähdytystehoa kohden on yleensä 0,3–0,4 kg/kW (esim. UNEP 1998b). Kylmäaineena on perinteisesti käytetty HCFC-22:ta, jota on edelleen selvästi eniten käytössä (UNEP 1999a). Sitä korvaamaan on kehitetty kaksi HFC-yhdisteiden seoskylmäainetta, jotka ovat R-407C ja R-410A (ks. liite B, taulukko B-1). R-407C on ilmastoinnin jäähdytyksen toimintalämpötila-alueella yleensä soveltuvin R-22:n korvaaja. HFC-134a tulee todennäköisesti kaupallistumaan suurten yksikköjärjestelmien (>100 kW) kylmäaineeksi (UNEP 1999a).

Vedenjäähdyttimissä jäähdytysenergian jakelu tapahtuu nimensä mukaisesti jäähdytetyn veden²⁹ avulla. Jäähdytyksen jakelupiiri voi kattaa huoneen, rakennuksen tai esimerkiksi kokonaisen kaupunginosan, jolloin puhutaan kaukojäähdytyksestä. Varsinaista kylmäainetta sisältävä primääripiiri on sijoitettu sovelluksesta riippuen esimerkiksi rakennuksen kellarikerrokseen, kattoon tai kokonaan erilliseen rakennukseen. Käyttökohteita ovat lähinnä suuret liike- ja julkiset rakennukset.

Vedenjäähdyttimien kapasiteetit vaihtelevat runsaasti sovelluksesta riippuen ja ovat tavallisesti 5–5 000 kW (Kaappola 1989), mutta myös muutaman kymmenen megawatin tehoisia järjestelmiä on käytössä (Sand & Fischer 1997). Kompessoreina käytetään hermeettisiä, puolihhermeettisiä sekä avomäntä-, ruuvi- ja turbokompressoreita (Kaappola 1989). Käytettävä kylmäaine riippuu muun muassa laitteen koosta ja kompressorin tyypistä. Perinteisiä kylmäaineita olivat CFC-11, CFC-12 ja HCFC-22 (UNEP 1998b). CFC-kylmäaineita on korvattu käytössä oleviin järjestelmiin HCFC- ja HFC-yhdisteitä sisältävillä huoltokylmäaineilla (UNEP 1999a). Uusissa asennettavissa järjestelmissä on otettu käyttöön HFC-kylmäaineet R-134a, R-407C ja R-410A (Little 1999) sekä hiilivetyjä ja ammoniakki, joiden käyttö on lisääntynyt erityisesti Pohjois-Euroopassa (UNEP 1999a). Erilaisten vedenjäähdytinsovellusten käyttö ilmastointiin on yleistynyt maailmanlaajuisesti viime vuosina ja sen uskotaan edelleen kasvavan (UNEP 1999a).

²⁹ Ulos asennettavissa kylmävesiasemissa käytetään tavallisesti vesi-glykoliseosta (Kaappola 2001).

4.1.11.2 Perusskenaario

Suomessa asennettiin vuonna 1999 noin 1100 kiinteää ilmastoinnin jäähdytykseen tarkoitettua laitetta, joihin käytettiin noin 15 t kylmäainetta. Veden jäähdyttimien osuus asennetusta laitekannasta oli noin 17 % ja loput koostuivat suorahöyrystysjärjestelmistä. Jäähdytettyjen rakennusten volyymi kasvoi koko 1990-luvun ja kasvun odotetaan edelleen olevan voimakasta. Perusskenaariossa oletettiin Sipilän (2001) mukaisesti, että jäähdytettyjen liike- ja julkisten rakennusten volyymi kasvaa vuodesta 1997 nelinkertaiseksi vuoteen 2010 mennessä, josta edelleen noin kaksinkertaiseksi vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi asuinrakennuksista (lähinnä kerrostaloista) noin 100 milj. m³:n ennakoidaan kuuluvan koneellisen jäähdytyksen piiriin vuonna 2030, jolloin jäähdytettyjen rakennusten volyymi olisi 293 milj. m³ (Sipilä 2001).

Perusskenaarion laadintaa varten arvioitiin koneellisen ilmastoinnin jäähdytystehon tarve ja siihen tarvittava kylmäainemäärä vuosien 1997, 2010 ja 2030 tasossa käyttämällä taulukossa 21 esitettyä jäähdytyksen mitoitustehoa (W/m³) ja kylmäainetäytöstä (kg/kW). Vuosittain käyttöön otettavan kylmäainemäärän arvioitiin riippuvan jäähdytettyjen rakennusten volyymin kehityksestä ja käytöstä poistuvista laitoksista, jotka oletettiin korvattavan vastaavalla kylmäainemäärällä. Näiden tietojen perusteella laskettiin vuosittain käyttöön otettavan kylmäainemäärän muutokset (taulukko 21). Ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleellimmat parametrit esitetään taulukossa 21.

Perusskenaariossa oletettiin kunkin HFC-kylmäaineen osuuden kasvaneen lineaarisesti vuodesta 1993 (osuus 0 %) vuoteen 1999 asti. Vuonna 1999 uusiin laitoksiin asennetun HCFC-22:n määrän (4,5 %) oletettiin vuonna 2000 korvautuneen R-407C:llä (taulukko 21). Koska R-404A ei tietävästi sovellu hyvin ilmastoinnin jäähdytykseen, arvioitiin sen osuuden pienenevän lineaarisesti 0 %:iin vuoteen 2005 mennessä. Muiden kylmäaineiden osuuksien muutosoletukset esitetään taulukossa 21 Vuodesta 2005 eteenpäin kylmäaineiden suhteellisten osuuksien arvioitiin pysyvän muuttumattomina. Asennettavien suorahöyrystysjärjestelmien ja veden jäähdyttimien suhteellisten osuuksien ei myöskään oletettu muuttuvan³⁰. Yksinkertaisuuden vuoksi suorahöyrystysjärjestelmien ja veden jäähdyttimien kylmäaineet, päästökertoimet ja käyttöiät arvioitiin yhtäläisiksi. Kiinteiden ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden perusskenaario esitetään kuvassa 12.

³⁰ Veden jäähdyttimien sisältämän kylmäainemäärän osuuden on vuonna 2010 arvioitu olevan Euroopassa noin 1/3 ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden sisältämästä määrästä (Harnisch & Hendriks 2000). Pitämällä laitteiden suhteellinen osuus vakiona on vedenjäähdyttimien sisältämä kylmäainemäärä vuonna 2010 noin 34 % ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden sisältämästä kokonaismäärästä.

4.1.11.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Ilmastoinnin jäähdytyksen kompressoritekniikkaa on mahdollista korvata absorptiotekniikalla, jota voidaan toteuttaa kompressoritekniikan tavoin joko rakennuskohtaisesti tai keskitetysti kaukojäähdytyksen avulla käyttämällä erillistä jäähdytetyn kiertoaineliuoksen jakeluverkkoa (Koljonen & Sipilä 1998). Absorptiotekniikka on ympäristön kannalta kompressoritekniikkaa parempi vaihtoehto, jos absorptiokoneistojen primäärienergia saadaan hukkalämmöstä, kuten sähköntuotannon sivutuotteena syntyvästä ylimääräisestä kaukolämmöstä tai jostain teollisuusprosessista³¹. Ilmastoinnin jäähdytykseen käytettävän absorptioprosessin³² työainepari on litiumbromidi-vesi.

Euroopassa tunnetaan erityistä mielenkiintoa juuri kaukolämmön hyödyntämiseen absorptiokoneistojen käyttöenergiana ilmastoinnin jäähdytysenergian tuottamisessa. Hajautetusti toteutetulla absorptiojäähdytyksellä voidaan hyödyntää olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa ja maantieteellinen ulottuvuus on laajempi kuin kaukojäähdytyksellä. Suomessa kaukolämpöveden kesäaikainen jakelulämpötila (noin 80 °C), pieni lämpötilan alenema (10–15 °C) ja kiinteistöjen kaukolämpötarpeen mukaan tehty liittymisjohdon mitoitus aiheuttavat kuitenkin ongelmia riittävän jäähdytystehon saavuttamiseksi (Koljonen & Sipilä 1998). Tällöin koneistojen mitoitus huipputehon mukaan kasvaa suureksi, jolloin sekä tilantarve että kustannukset kasvavat. Näitä ongelmia voidaan useissa tapauksissa ratkaista jäähdytyksen jakelulämpötilaa nostamalla, huonelämpötilojen ja jäähdytysveden lämpötilan liu'utuksella sekä jäähdytysenergian talteenotolla ja varastoinnilla (Leskinen & Heikkinen 2000). Tällaisten menetelmien tehokas käyttö vaatisi kuitenkin niiden huomioimisen jo rakennusten suunnitteluvaiheessa (Leskinen & Heikkinen 2000). Hajautetun absorptiojärjestelmän ongelma on myös tarvittavan lauhdutuksen toteuttaminen sekä laitteiston ja jäähdytystornien tilantarve.

Kaukojäähdytys vaatii erillisen lämmönsiirtoaineen siirtoverkoston rakentamista, mutta siihen liittyy monia etuja kiinteistökohtaisiin, kompressori- tai absorptiotekniikalla toteutettuihin järjestelmiin verrattuna. Suomen ilmastollisissa olosuhteissa keskitetty jäähdytysenergian siirto on tehokas, mikäli siinä voidaan hyödyntää lähistöllä sijaitsevaa vesistöä (Iso-Herttua & Riipinen 2000). Tällöin tarvittava jäähdytysteho voidaan siirtää kylminä vuodenaikoina esiintyvien kaukolämmön kulutushuippujen

³¹ Ylimääräisellä kaukolämmöllä tarkoitetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantoprosessissa hyödyntämättä jäävää kaukolämpöä (esim. kesäaikoina, jolloin kaukolämmön kulutus on alhainen).

Teollisuusprosesseilla voi olla paikallisia hyödyntämismahdollisuuksia.

³² Suomalaista kaukolämpöä taloudellisesti hyödyntävä absorptioprosessi voi olla ainoastaan yksivaiheinen (single-effect) tai yksivaiheinen-kaksiportainen (single-effect/double-lift) prosessi (Koljonen & Sipilä 1998)

aikana jakeluverkkoon lämmönsiirtimien avulla. Vesistöä on mahdollista hyödyntää myös kuumimpina kuukausina lauhdutustarkoitukseen (Iso-Herttua & Riipinen 2000). Kaukojäähdytys säästää rakennuksista hajautetun laitteiston vaatiman tilan, joka voidaan hyödyntää muuhun tarkoitukseen. Kaukojäähdytyksen soveltuvuus valtakunnan laajuudessa on kuitenkin rajallinen, sillä käytännössä vain suurimpien kaupunkien tiiviisti rakennetut alueet ovat toteutettavissa liiketaloudellisesti järkevällä tavalla.

Pienten absorptiokoneistojen hankintahinta on suurempi kuin vastaavantehoisten kompressorikoneiden, mutta 500 kW:sta ylöspäin hintaero kaventuu ja yli 1 MW:n absorptiolaitokset saattavat olla jo edullisempia (Koljonen & Sipilä 1998). Absorptiokoneistojen ylläpitokustannukset ovat huomattavasti pienemmät ja vastaavasti käyttöikä (noin 30 vuotta) selvästi pidempi kuin kompressorikoneistolla yleensä (Iso-Herttua & Riipinen 2000), joten ne ovat elinkaarikustannustarkastelussa keskenään vähintäänkin kilpailukykyisiä. Absorptiotekniikalla toteutetun ilmastoinnin jäähdytyksen käytön yleistymisen ennustaminen on kuitenkin hankalaa. Ratkaisevia tekijöitä ovat muun muassa sähkön hinnan, energiantuotannon rakenteen, taloteknisen suunnittelun, kaukolämpötekniikan ja absorptiokoneistojen sekä ympäristönsuojelullisten ohjauskeinojen kehitys.

Kompressoritekniikalla toteutetun ilmastoinnin jäähdytyksen aiheuttamia päästöjä voidaan vähentää myös käyttämällä halogenoituille yhdisteille vaihtoehtoisia kylmäaineita. Hiilivetyjä voidaan käyttää mahdollisesti pienissä suoraohyrystysjärjestelmissä, joissa kylmäainetäytös on noin 0,1–1,5 kg (UNEP 1998b). Suuremmat hiilivetytätökset (muutamia kilogrammoja) vaativat sekundääripiirin, jolloin energiahyötysuhde huononee vastaavantehoiseen suoraohyrystystoteutukseen verrattuna. Koska Suomen ilmastollisissa olosuhteissa ilmastoinnin jäähdytyksen huipunkäyttöaika on verrattain lyhyt, ei huonommalla energiahyötysuhteella ole kuitenkaan läheskään samanlaista merkitystä kuin lähes jatkuvasti käytössä olevissa kylmlaitoksissa. Välillisten HCFC-, HFC- tai hiilivetyjärjestelmien keskinäisissä energiahyötysuhteissa ei ole merkittäviä eroja. Suurissa vedenjäähdyttimissä voidaan käyttää myös ammoniakkia, jonka käyttö ilmastointitarkoitukseen edellyttää kuitenkin turvallisuussyistä muutoksia talotekniseen suunnitteluun muun muassa hätätuuletuksen järjestelyissä (Lamberg et al. 2000). Ammoniakin käyttö veden jäähdyttimissä on kuitenkin yleistynyt erityisesti Pohjois-Euroopassa. Tällaiset järjestelmät saattavat kuluttaa jopa 10 % vähemmän energiaa kuin vastaavantehoiset HFC-toteutukset (UNEP 1999a). Lisäksi hiilidioksidin kylmäainekäyttöön liittyvät tutkimukset saattavat johtaa ylikriittisen CO₂-järjestelmän kaupallistumiseen jo vuosien 2005–2010 välisenä aikana (UNEP 1999a). Lisäkustannusarviot hiilivety- ja ammoniakkikäyttöisille järjestelmille esitetään taulukossa 20.

Kylmäainevuotoja voidaan vähentää kohdassa 4.1.4.3 kuvatuilla päästöjen hallintaan ja parannettuun laitekonstruktioon liittyvillä toimilla arviolta 40 %:a käytössä olevista ja 60 %:a uusista asennettavista laitoksista. Vuotojen vähentämisen lisäkustannusarviot esitetään taulukossa 20.

Taulukko 20. Arvioidut päästövähennystoimenpiteistä aiheutuvat keskimääräiset lisäkustannukset ilmastoinnin jäähdytyksessä (Harnisch & Hendriks 2000).

järjestelmä / toimenpide	lisäinvestoinnit [mk/t _{HFC}]	energian käytön kasvu	huoltokustannuksia [mk/t _{HFC,a}]
suorahöyrystys / välillinen HFC	190 000	20 %	18 000
suorahöyrystys / välillinen hiilivety	480 000	20 %	18 000
suorahöyrystys / vuotojen vähentäminen	50 000	0 %	30 000
veden jäähdytin / hiilivedyt, ammoniakki	120 000	0 %	12 000
veden jäähdytin / vuotojen vähentäminen	20 000	0 %	30 000

4.1.11.4 Päästövähennyskenaario ja -kustannukset

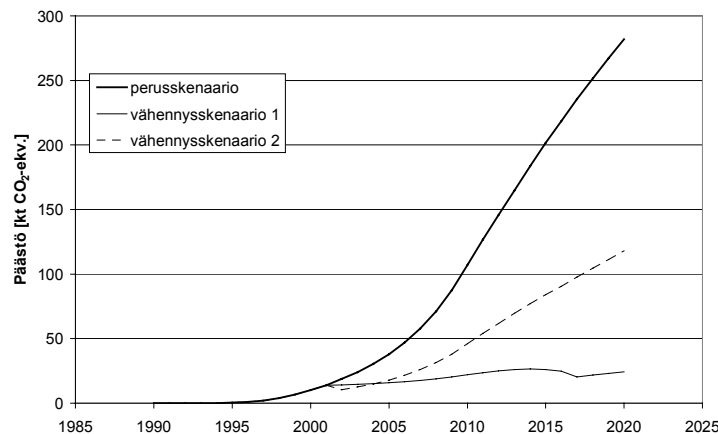
Kiinteiden ilmastointilaitteiden päästövähennystoimiksi valittiin joko HFC-kylmäaineen korvaaminen hiilivedyillä ja vedenjäähdyttimissä vaihtoehtoisesti ammoniakilla tai vuotojen vähentäminen. Absorptiojäähdytystä ei huomioitu päästövähennyskenaariossa, mikä johtui siihen liittyvästä tiedonpuutteesta muun muassa valtakunnan laajuisen sovellettavuuden suhteen. Kaukojäähdytys on kuitenkin yleistymässä, ja sen toteuttamisessa absorptiotekniikka on varteenotettava vaihtoehto. Sillä voidaan paikallisesti saavuttaa merkittäviäkin päästövähennyksiä.

Taulukko 21. Kiinteiden ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario	vähennys 1 (välilliset HC- ja NH ₃ -järjestelmät)	vähennys 2 (vuotojen vähentäminen)
asennetut uudet laitteet vuonna 1999	1 088 kpl		
asennettu kylmäainemäärä vuonna 1999	14 694 kg		
veden jäähdyttimien osuus asennetusta laitekannasta vuonna 1999	16,9 %		
veden jäähdyttimien osuuden muutos laitekannassa 2000–2020	+0 %/a	+0 %	+0 %
uusiin laitteisiin vuosittain asennettavan kylmäainemäärän muutos: - ennen vuotta 1990 - vuosina 1990–2010 - vuosina 2011–2020	+ 0 %/a +21,6 %/a +0,6 %/a		
keskimääräinen kylmäainetäytös: - suoraohyrystyslaitteet - veden jäähdyttimet	10,9 kg 28,2 kg		10,9 28,2
uusiin laitteisiin asennetut kylmäaineet vuonna 1999: - R-407C - R-404A - R-134a - R-22 - R-410 A	51,8 % 22,9 % 20,5 % 4,5 % 0,3 %		
uusiin laitteisiin asennettavat kylmäaineet vuosina 2000–2005 (2020): - R-407C - R-404A - R-134a - R-410A	56,3 -> 10 % 22,9 -> 0 % 20,5 -> 40 % 0,3 -> 50 %	0 % 0 % 0 % 0 %	56,3 % 22,9 % 20,5 % 0,3 %
jäähdytettävien rakennusten volyymi 1997	24 milj. m ³		
jäähdytettävien rakennusten volyymi 2010	96 milj. m ³		
jäähdytettävien rakennusten volyymi 2030	293 milj. m ³		
jäähdytyksen mitoitusteho	20 W/m ³		
keskimääräinen kylmäainetäytös kylmätehoa kohden	0,35 kg/kW		
päästökertoimet: - asennus - käyttö - käytöstäpoisto	0,7 % 10 % 15 %	0,7 % 10 % 15 %	0,7 % 4–6 % 12 %
laitteiden käyttöikä	15 a	15 a	15 a

Vähennysskenaariossa 1 oletettiin, että kaikki uudet asennettavat laitokset toteutetaan välillisellä jäähdytysperiaatteella vuoden 2002 alusta alkaen. Suoraohyrystysjärjestelmät oletettiin korvattavan vastaavan tehoisilla täysin välillisillä (jäähdytys ja lauhdutus) hiilivetylaitteilla, ja veden jäähdyttimissä oletettiin käytettävän sovelluksesta riippuen joko ammoniakkaa tai hiilivetyä. Suoraohyrystysjärjestelmien keskimääräisen kylmäainetäytöksen tehoa kohden arvioitiin olevan 0,35 kg/kW, jäähdytyskertoimen (COP) 4,0 ja kiinteistöjen jäähdytyksen huipunkäyttöajan 600 h/a. Näiden perusteella lasketun keskimääräisen vuotuisen energiankäytön (noin 430 MWh/t_{HFC}) arvioitiin sekundääripiirin vuoksi kasvavan 20 %. Sähkön hinnaksi oletettiin 40 p/kWh (ks. kohta 3.3.1) ja sähköntuotannon keskimääräiseksi päästökertoimeksi 250 g CO₂/kWh (ks. kohta 3.2.2). Veden jäähdyttimien HFC-kylmäaineen korvaamisen ammoniakilla tai hiilivedyllä ei oletettu muuttavan järjestelmien energiahyötysuhdetta.

Vähennysskenaariossa 2 oletettiin uusien laitteiden tiiviyyttä parannettavan vuodesta 2002 eteenpäin, jolloin myös tehokkaammat huoltomenetelmät ja käytön seurantamenetelmät oletettiin otettavan käyttöön koko laitekannassa. Toimenpiteiden seurauksena käytön ja käytöstä poiston aikaisten päästöjen arvioitiin pienenevän taulukossa 21 esitetyille tasoille. Kiinteän ilmastoinnin päästövähennysskenaariot 1 ja 2 esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Perus- sekä päästövähennysskenaariot 1 (välilliset HC- tai NH₃-järjestelmät) ja 2 (vuotojen vähentäminen) kiinteille ilmastoinnin jäädytyslaitteille.

Toteuttamalla vuodesta 2002 alkaen kaikki uudet laitokset ammoniakilla tai hiilivedyillä saavutetaan Kioton ensimmäisenä velvoitekaudena noin 80 %:n ja vuonna 2020 noin 90 %:n päästövähennys. On huomattava, että vähennysskenaariossa 1 vanhasta laitekannasta aiheutuvien kylmäainepäästöjen on arvioitu loppuvan kokonaan vuonna 2016, jonka jälkeen kaikki päästöt aiheutuvat välillisiksi järjestelmiksi näennäisesti muutettujen suoraohjarystyslaitteistojen lisääntyneestä energiankulutuksesta. Vuotojen vähentämisellä saavutettavat päästövähennykset ovat vastaavasti noin 60 % sekä KIOTO 1 että vuoden 2020 tasossa. Taulukossa 22 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 22. Kiinteiden ilmastoinnin jäädytyslaitteiden päästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario 1 (välilliset HC- ja NH ₃ -järjestelmät)			vähennysskenaario 2 (vuotojen vähentäminen)		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset		päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset	
			[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]		[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-	0	-	-
2000	10	10	-	-	10	-	-
KIOTO 1	127	22 (14)*	280	283	46	120	243
2020	345	24 (0)*	620	201	118	320	169

* suluissa suorat kylmäainepäästöt

4.1.12 Ajoneuvojen ilmastointilaitteet

4.1.12.1 Yleistä

Ajoneuvojen ilmastointilaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä noin 31 kt CO₂-ekvivalenttia (kuvat 13 ja 14) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 9 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,04 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Ilmastointilaitteita on ollut käytössä ajoneuvoissa matkustusolosuhteiden parantamiseksi jo vuosikymmeniä. Ennen 1970-lukua niitä käytettiin pääasiassa vain Yhdysvalloissa valmistetuissa ajoneuvoissa. 1980-luvulla ilmastointilaitteet otettiin myös japanilaisessa autoteollisuudessa voimakkaasti mukaan tuotantoon. Ne ovat sittemmin yleistyneet laajalti, ja varsinkin Euroopassa kasvu on viime vuosien aikana ollut voimakasta. Ilmastointilaitteita on asennettu kaikentyyppisiin autoihin sekä muun muassa matkustajajuniin ja raitiovaunuihin. Ilmastointilaitteiden suhteellinen osuus vuosittain käyttöönotettavissa kulkuvälineissä vaihtelee kuitenkin runsaasti maasta riippuen. Henkilö- ja pakettiautoissa osuus on Yhdysvalloissa ja Japanissa tällä hetkellä noin 100 % (Little 1999), kun vastaava määrä Suomessa on 25–35 % (Oinonen 2000).

Ajoneuvojen ilmastointilaitteiden toiminta perustuu pääasiassa suora-höyrystykseen. Kylmäaineena käytettiin perinteisesti CFC-12:ta, jonka täytösmäärät olivat vielä 1990-luvun alussa henkilöautoissa noin 1,5 kg ja linja-autoissa keskimäärin 12 kg. 1990-luvun puolivälin paikkeilla R-12 korvattiin uusissa asennettavissa laitteissa HFC-134a:lla, jonka termodynaamiset ominaisuudet ovat hyvin samankaltaiset R-12:n kanssa. R-134a-sovellukset toimivat kuitenkin korkeammassa paineessa, mikä on asettanut lisävaatimuksia käytettäville materiaaleille sekä altistanut laitteita vuodoille ja vioille.

Tällä hetkellä maailmanlaajuisesti lähes kaikkien ajoneuvojen ilmastointilaitteet valmistetaan toimimaan R-134a-kylmäaineella. Laitteiden täytösmäärät ovat tuotekehityksen tuloksena jatkuvasti pienentyneet. Henkilö- ja pakettiautojen ilmastointilaitteissa on nykyään tavallisesti 0,7–1 kg, kuorma-autoissa alle 2 kg ja linja-autoissa noin 10 kg kylmäainetta. Muutamissa maissa (esimerkiksi Australiassa) käytetään palavia hiilivetyjä suora-höyrystykseen perustuvissa järjestelmissä, jotka oli alun perin tarkoitettu toimimaan R-12:lla tai R-134a:lla (Pedersen 1998). Tällaisten järjestelmien käytön, huollon tai onnettomuuksien aikainen turvallisuus on kyseenalainen, joten niitä ei monissakaan maissa hyväksytä.

Ilmastointilaitteet täytetään ensimmäisen kerran auton kokoonpanon yhteydessä tehtaalla tai asennettaessa laitetta jälkikäteen. Laitteet eivät ole hermeettisesti suojattuja, ja lisäksi niiden kompressori on altis moottorissa tapahtuville värinöille. Käytön aikaiset päästöt aiheutuvat kylmäaineen diffuusiosta materiaalien lävitse, letku- ja putkiyhteiden kautta tapahtuvista vuodoista sekä laitteen vaurioitumisesta, joka voi vaihdella pienestä letkuvuodosta laitteen tuhoutumiseen asti (esimerkiksi kolarin yhteydessä). Erityisen vuotoherkkä kohta on kompressorin akselitiiviste (Kauppinen 2000). Muita tyypillisiä vikoja ovat suolan ja veden aiheuttamasta korroosiosta johtuva lauhduttimen vuotaminen sekä vuotavat kumiletkut. Huollon aikaiset päästöt vaihtelevat runsaasti riippuen laitteen vian laadusta ja huoltokäytännöstä. Joissakin huoltoja suorittavissa yrityksissä kylmäaine otetaan talteen joka tapauksessa, kun taas toisissa vain, mikäli siihen ei ole sekoittunut jonkin vian seurauksena liiallisia määriä kylmäaineen pilaavia epäpuhtauksia. On myös mahdollista, että minkäänlaista talteenottoa ei ole toteutettu. Nämä käytännöt koskevat myös laitteen käytöstäpoistoa. Suomessa kylmäaineen talteenotto ajoneuvojen ilmastointilaitteista on tiettävästi vähäistä.

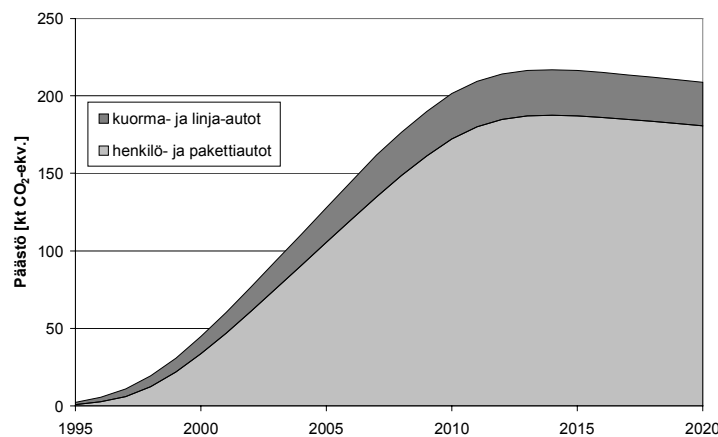
4.1.12.2 Perusskenaario

Suomessa rekisteröitiin vuonna 1999 noin 150 000 henkilö- ja pakettiautoa, 4 700 kuorma-autoa sekä 450 linja-autoa. Rekisteröinneistä ilmastoitujen ajoneuvojen osuus oli noin 30–75 % ajoneuvon tyypistä riippuen. Suomessa vuosittain käyttöön otettavien ajoneuvojen ja ilmastointilaitteiden osuuksien tiedot vuosilta 1990–1999 ja ennusteet vuoteen 2020 esitetään liitteessä F. Muut ajoneuvojen ilmastointilaitteiden skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit esitetään taulukossa 24.

Skenaarioita laadittaessa käytettiin uusien ajoneuvojen vuosittaisten rekisteröintien lukumääriä (liite F). Ilmastoitujen ajoneuvojen osuus vuosittaisista rekisteröinneistä perustuu autojen maahantuojille tehtyyn kyselyyn (1995–1999) (Oinonen 2000). Osuuden kehittyminen henkilö- ja pakettiautojen osalta on projisoitu sovittamalla logistinen käyrä aineistoon ja olettamalla osuuden tasaantuvan maksimitasolle 0,5 (joka toinen käyttöönotettava uusi ajoneuvo on ilmastoitu). Kuorma- ja pakettiautojen osalta käytettiin tulevien osuuksien arvioimiseen karkeampaa, kyselyaineistoon perustuvaa graafista menetelmää. Ilmastoitujen linja-autojen (ml. kaupunkiliikenteen bussit) osuuden arvioitiin vakiintuvan tasolle 50 % ja ilmastoitujen kuorma-autojen osuuden tasolle 80 %. Yksityiskohtaiset projektiot osuuden kehittymiselle esitetään liitteessä F.

Teknologisen kehityksen myötä henkilö- ja pakettiautojen ilmastointilaitteiden keskimääräisen täytöksen oletettiin pienentyvän lineaarisesti vuoden 1995 keskimääräisestä 0,835 kg:n täytöksestä vuoden 2020 keskimääräiseen 0,650 kg:aan. Linja- ja kuorma-autojen täytöksen arvioitiin pienentyvän vastaavassa suhteessa (taulukko 24).

Perusskenaariossa oletettiin kaiken asennettavan kylmäaineen olevan R-134a:ta. Lähes kaikki henkilö- ja pakettiajoneuvojen ilmastointilaitteet tuodaan Suomeen esitetyinä (valmiiksi autoon asennettuina), joten asennuksen päästöjä ei arvioitu tapahtuvan. Sen sijaan linja- ja kuorma-autoille oletettiin 5 %:n asennuspäästö. Loppuun käytettyjen laitteiden sisältämästä kylmäaineesta arvioitiin otettavan talteen 80 %. Tämän oletettiin pääasiassa olevan seurausta valmisteilla olevasta EU-direktiivistä³³, jonka mukaan loppuun käytetyistä ajoneuvoista on otettava jäähdytyslaitteen sisältämät nesteet talteen. Ajoneuvojen ilmastointilaitteiden HFC-134a-päästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 13.



Kuva 13. Perusskenaario ajoneuvojen ilmastointilaitteiden HFC-134a-päästöille.

4.1.12.3 Päästöjen vähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Eri päästöjen vähennysmenetelmiä vertailtaessa on huomioitava, että ajoneuvojen ilmastointilaitteiden kokonaisvaikutus ilmastomuutokseen riippuu kylmäaineen suorien päästöjen lisäksi useista eri epäsuoria päästöjä aiheuttavista tekijöistä. Tarvittavan laitteiston painon lisääntyminen vaikuttaa ajoneuvon polttoainekulutukseen. Myös laitteiston konstruktio ja kylmäaineen energiatehokkuus ovat tärkeitä kriteereitä vaihtoehtoja punnittaessa. Energiatehokkuuden merkitys kokonaisvaikutukseen puolestaan riippuu paikallisesta ilmastosta, ajoneuvon käytöstä ja koosta sekä myös useasta muusta tekijästä. Lisäksi on huomioitava vaihtoehtojen turvallisuusnäkökohdat ja kustannustehokkuus sekä käyttöönottoaikataulun määräävä tekninen kypsyys.

³³ 1999/C 156/05; Muutettu ehdotus neuvoston direktiivistä loppuun käytetyistä ajoneuvoista; Euroopan yhteisöjen virallinen lehti 3.6.1999.

Tällä hetkellä ajoneuvojen ilmastointilaitteiden päästöjen vähentämiseksi on esitetty muutamia teknisiä vaihtoehtoja, joista osa liittyy R-134a-järjestelmän parantamiseen tai päästöjen hallintaan ja osa vaihtoehtoisten kylmäaineiden käyttöönottamiseen. Kaikki vaihtoehtoista ovat oletettavasti toteutettavissa turvallisiksi ja tuottamaan yhtäläisen jäähdytystehon kuin nykyiset R-134a-järjestelmät. Aiheutuvat kustannukset ja energiankäyttö saattavat kuitenkin lisääntyä. Taulukossa 23 luetellaan tällä hetkellä yleisesti tutkimuskohteina olevat päästövähennysmenetelmät ja niiden arvioitu kaupallistumisaikataulu.

Taulukko 23. Yleisimmät tutkimuskohteina olevat ajoneuvojen ilmastointilaitteiden potentiaaliset päästöjen vähennysmenetelmät ja niiden arvioidut teknologiset kypsyydet (Baker 2000).

päästövähennysmenetelmä	potentiaalinen käyttöönottovuosi
R-134a-järjestelmän parannettu huolto ja käytöstäpoisto	2001–2003 ^{A)}
parannettu R-134a-järjestelmä	2001–2003
hermeettinen R-134a-järjestelmä	2004–2005
hiilivetykäyttöinen epäsuorajärjestelmä	2004–2005
HFC-152a-käyttöinen epäsuorajärjestelmä ^{B)}	2004–2005
ylikriittinen CO ₂ -järjestelmä	2004–2007

^{A)} teollisuudessa käyttöönotto mahdollista arviolta 2001–2002, kehitysmaissa 2002–2003

^{B)} HFC-152a:n GWP₁₀₀-arvo on noin 90 % pienempi kuin HFC-134a:n

R-134a-järjestelmän huollon ja käytöstäpoiston yhteydessä toteutetulla talteenotolla voidaan nostaa kierrätysaste arviolta noin 90 %:iin (Baker 2000). HFC-134a-yhdisteen käsittelylaitteita on kaupallisesti saatavilla. Laite maksaa automatiikasta riippuen noin 17 000–30 000 markkaa, ja käyttökustannukset (lähinnä öljyn ja suodattimien vaihto) ovat noin 500 mk/a (Kaha Oy 2000). Käytössä olevien laitteiden määriä ei kuitenkaan ollut tiedossa. Lisäksi ajoneuvojen ilmastointilaitteiden huoltoja suorittavien yritysten runsaudesta johtuen tarvittavien käsittelylaitteiden määrää on vaikea arvioida.

Parantamalla nykyisen R-134a-järjestelmän konstruktiota ja valitsemalla laadukkaampia komponentteja voidaan parantaa laitteiston energiahyötysuhdetta, vähentää vuotoja ja siten myös pienentää tarvittavaa täytöstä. Tämän menetelmän hyöty on sitä suurempi mitä paremmin kylmäaineen talteenotto ja kierrätys toteutetaan. Vuotojen vähentämiseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi käyttämällä tiiviimpiä eristysmateriaaleja, kuten HNBR- ja EPDM-kumia (Baker 1999). Kompressorin akselissa on mahdollista käyttää moninkertaista tiivistettä yksinkertaisen sijasta. Vuotoherkkiä letkuja voidaan korvata valmistusvaiheessa oikeaan muotoonsa taivutetuilla kupariputkilla, jolloin tarvittavien liitosten lukumäärä saadaan alhaiseksi (Kauppinen 2000). Kohteissa, joissa letkua joudutaan käyttämään (esimerkiksi jälkiasennuksissa), voidaan pyrkiä ottamaan käyttöön uusia vähemmän HFC-134a:ta läpäiseviä materiaaleja. Vuotojen vähentäminen tasolle 5 %/a maksaa arviolta noin 60 mk/auto (Harnisch & Hendriks 2000).

Sähkökäyttöiset ilmastointijärjestelmät voidaan sulkea hermeettisesti, joka yhdistettynä täyteen talteenottoon ja kierrätykseen alentaa päästöt lähelle nollaa. Tällaisia kiinteitä jäähdytysjärjestelmiä on ollut käytössä jo vuosia. Soveltaminen autoteollisuuteen riippuu paljolti ajoneuvojen sähköenergian kapasiteetista. Teknologia on lupaava kehitteillä olevia suurjännitepolttomootori-, sähkö- ja hybridautoja varten (Baker 2000). Ensimmäiset sovellukset voitaisiin saada käyttöön arviolta 4–5 vuoden kuluttua.

Palavien kylmäaineiden käyttö ajoneuvojen ilmastointilaitteissa on kohdannut hyvin paljon vastustusta ympäri maailmaa, mikä johtuu mahdollisista turvallisuusriskeistä. Ajoneuvojen valmistajat ja toimittajat tutkivat ja kehittävät yhteistyössä välillistä jäähdytysjärjestelmää, jolla turvallisuus saataisiin taattua. Delphi Automotiven vuonna 1999 kehittämän välillisen järjestelmän prototyyppi pystyi antamaan kilpailukykyisen jäähdytystehon R-134a-järjestelmään verrattuna, mutta energiatehokkuus oli noin 15–20 % huonompi (Ghodbane 1999). Hiilivedyistä kyseeseen tulevat propaani ja isobutaani sekä näiden väliset seokset. Aiheutuvan kokonaiskasvihuonekaasuhaitan kannalta hiilivedyt olisivat soveltuvimpia kylmiin ja kuiviin ilmastoihin, joissa jäähdytystehon tarve on vähäinen. Tällaisissa olosuhteissa niillä voidaan päästä alhaisempiin kokonaispäästömääriin kuin jopa nykyisestä parannetuilla R-134a-järjestelmillä (liite G). Sen sijaan kuumemmissa ja kosteissa ilmastoissa lisääntyneestä energiankulutuksesta aiheutuvat epäsuorat päästöt ovat suuremmat kuin jopa kaksinkertaisen uudelleen täytön vaativalla R-134a-järjestelmällä (liite G). Välillistä järjestelmää harkitaan käytettäväksi myös HFC-152a:lla, jonka käyttö on turvallisempaa kuin propaanin tai isobutaanin, sillä sen palamislämpö on noin kaksi kolmasosaa alhaisempi (liite B, taulukko B-1). Vaikka palavien yhdisteiden käyttöönotto välillisissä järjestelmissä vaatii vielä paljon testausta, standardien ja asianmukaisen huolto-käytännön kehittämistä sekä valmistus- ja huoltotyömiesten koulutusta, se on teknisesti kypsempi vaihtoehto kuin hermeettinen HFC-134a- tai CO₂-järjestelmä (Baker 2000). Suhteellisen suuria ilmastointilaitteita käyttävissä ajoneuvoissa (esimerkiksi linja-autoissa) on välillisen järjestelmän arvioitu olevan halvempi kuin vastaavan suoraohrystyksen perustuvan laitteiston (Öko-Recherche 1999). Tarkempia kustannusarvioita ei kuitenkaan ollut saatavissa.

Hiilidioksidin uskotaan kuitenkin lähitulevaisuudessa olevan todennäköisin HFC-134a:n korvaaja ajoneuvojen ilmastointilaitteissa. Sen käyttöä tutkitaan pääasiassa ylikriittisessä tilassa toimivana järjestelmänä³⁴, jonka rakenne on hyvin erilainen kuin R-134a-laitteiston. Ylikriittisen CO₂-järjestelmän korkeapainepuolen toimintapaine (noin 13–15 MPa) on yleensä yli kuusi kertaa korkeampi kuin vastaavan R-134a-järjestelmän (Little 1999). Korkea paine asettaa vaatimuksia käytettäville materiaaleille

³⁴ Absorboivaa matalapaineista CO₂-järjestelmää tutkitaan myös, mutta siitä on julkaistu hyvin vähän teknistä tietoa.

ja huoltohenkilöstön kouluttamiselle. Onnettomuustilanteiden varalta saattaa olla tarpeellista käyttää hiilidioksidivuodon ilmaisimia ja hätätuuletusjärjestelmiä ajoneuvon matkustajien hiilidioksidimyrkytyksen estämiseksi (Baker 2000). Järjestelmän hyötysuhde riippuu oleellisesti kaasujäähdyttimelle saapuvan ilman lämpötilasta, johon puolestaan vaikuttavat muun muassa ajonopeus ja ympäristön lämpötila. Tällä hetkellä prototyypeillä pystytään tuottamaan kilpailukykyinen jäähdytysteho R-134a-laitteisiin verrattuna, mutta energiahyötysuhde on hieman huonompi³⁵. Lisäksi laitteiston konstruktion vaatimat komponentit nostavat painoa. Lisääntynyt energiankäyttö rajoittaa CO₂-järjestelmän soveltuvuutta varsinkin kuumiin ja kosteisiin ilmastoihin (liite G). Järjestelmä voisi kuitenkin olla jo nykyisellä hyötysuhteella soveltuva esimerkiksi Pohjois-Eurooppaan. Kaupallistuminen vaatii vielä hyötysuhteen parantamista, vaarallisten hiilidioksidivuotojen havaitsemis- ja tuuletusjärjestelmien käyttöä sekä huoltoteknikoiden kouluttamista. Ensimmäiset kaupalliset järjestelmät saadaan käyttöön arviolta 2004–2008 (esim. Baker 2000, Öko-Recherche 1999). Harnisch & Hendriks (2000) arvioivat, että ylikriittinen CO₂-järjestelmä voisi tulla kaupalliseen käyttöön vuonna 2004. Lisäinvestoinnit henkilö- tai pakettiajoneuvoa kohden ovat arvion mukaan noin 300 mk, mutta käyttökustannukset (pääasiassa energia) on oletettu yhtäläisiksi R-134a-järjestelmän kanssa. Kuorma- ja linja-autojen vaativien suurempien ilmastointilaitteiden lisäkustannuksia ei ole tiedossa. CO₂-järjestelmän odotetaan kuitenkin soveltuvan myös suuriin ajoneuvoihin (Öko-Recherche 1999).

Eri vaihtoehtoisten tekniikoiden kokonaispäästöjä vertailtaessa on huomioitava, että R-134a-järjestelmän kylmäainevuodoilla ja huoltokäytännöillä on hyvin suuri merkitys lopputulokseen. Esimerkiksi liitteestä G havaitaan, että mikäli HFC-134a:n efektiivistä vuotoastetta voidaan alentaa tasolle 4 %/a, järjestelmä on vaihtoehtojaan parempi lähes kaikissa tarkastelluissa olosuhteissa (poikkeuksena Frankfurt). Palavilla kylmäaineilla toimivat epäsuorat laitteistot ja ylikriittinen CO₂-järjestelmä ovat kuitenkin osoittautuneet päästömääriltään kilpailukykyisiksi nykyisen ja jopa parannetun HFC-134a-järjestelmän kanssa ilmastoihin, joissa jäähdytystehon tarve on verrattain pieni (esim. Pohjois-Euroopassa).

4.1.12.4 Päästövähennysskenaario

Ajoneuvojen ilmastointilaitteiden päästövähennystoimiksi valittiin joko R-134a-järjestelmän korvaaminen ylikriittisellä CO₂-järjestelmällä tai parannetulla tiiviydellä saavutettava vuotojen väheneminen.

³⁵ Eräs valmistaja on ilmoittanut CO₂-prototyypille korkeamman energiahyötysuhteen kuin tämän hetken HFC-134a-järjestelmälle (Baker 2000).

Taulukko 24. Ajoneuvojen ilmastoinnin skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario			vähennys- skenaario 1 ³⁶	vähennys- skenaario 2 ³⁷
	henkilö- ja pakettiautot	linja-autot	kuorma-autot	kaikki ajoneuvot	
keskimääräinen täytös	0,84–0,65 kg	10,46–8,18 kg	1,78–1,40 kg		
uusiin laitteisiin asennetut kylmäaineet 1995–2003: - R-134a	100 %	100 %	100 %		100 %
uusiin laitteisiin asennettavat kylmäaineet vuosina 2004–2020: - R-134a - R-744 (hiilidioksidi)	100 % 0 %	100 % 0 %	100 % 0 %	0 % 100 %	100 % 0 %
päästökertoimet:					
- asennus	0 %	5 %	5 %		0–5 %
- käyttö	20 %	20 %	20 %		5 %
- käytöstäpoisto	20 %	20 %	20 %		20 %
laitteiden käyttöikä	12 a	12 a	12 a	12 a	12 a

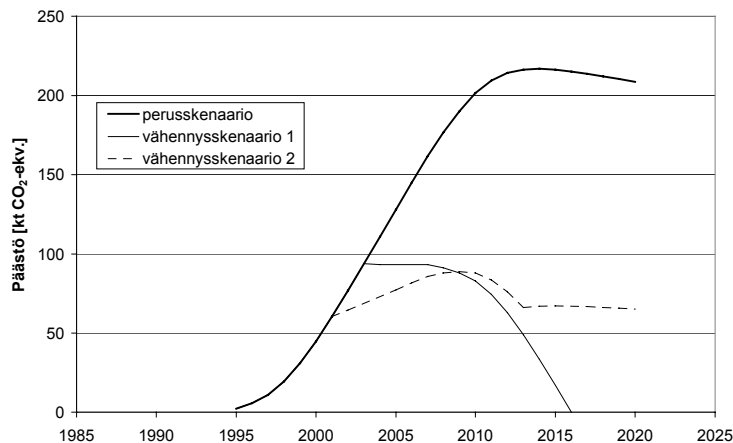
Päästövähennysskenaariossa 1 arvioitiin CO₂-järjestelmän tulevan kaupalliseen käyttöön vuonna 2004, mistä eteenpäin kaikki uudet ilmastointilaitteet ovat hiilidioksidikäyttöisiä. Järjestelmän energiahyötysuhteen oletettiin olevan yhtäläinen tämän hetken R-134a-laitteen kanssa, koska sen arvioitiin olevan oleellisimpana kriteerinä tekniikan kaupallistumiselle. CO₂-järjestelmän aiheuttamat lisäinvestoinnit kuorma- ja linja-autoille arvioitiin suhteuttamalla kustannukset kylmäainetäytöksiin.

Päästövähennysskenaariossa 2 oletettiin kaikkiin vuoden 2001 jälkeen käyttöön otettaviin uusiin ilmastointilaitteisiin tehtävän tiiviyyttä parantavia muutoksia, joiden avulla käytön aikaisten päästöjen oletettiin pienentyvän tasolle 5 %/a (taulukko 24). Muutosten ei kuitenkaan ennakoitu vaikuttavan asennuksen³⁸ tai käytöstäpoiston päästöihin. Toimenpiteiden lisäkustannukset kuorma- ja linja-autoille arvioitiin vastaavalla tavalla kuin vähennysskenaariossa 1. Päästövähennysskenaariot 1 ja 2 esitetään kuvassa 14.

³⁶ Ylikriittinen CO₂-järjestelmä

³⁷ Vuotojen vähentäminen

³⁸ Taulukossa 24 vähennysskenaariolle 2 esitetyistä asennuksen päästökertoimista 0 % koskee henkilö- ja pakettiautoja, 5 % kuorma- ja linja-autoja



Kuva 14. Perus- ja päästövähennysskenaariot 1 (ylikriittinen CO₂-järjestelmä) ja 2 (vuotojen vähentäminen) ajoneuvojen ilmastointilaitteiden HFC-134a-päästöille.

Mikäli ylikriittinen hiilidioksidijärjestelmä on kaupallisella tasolla vuodesta 2004 eteenpäin, saavutetaan Kioton ensimmäisenä velvoitekautena keskimäärin noin 60 %:n ja vuonna 2020 100 %:n päästövähennys. Vastaavasti vuotojen vähentämisellä saavutettava vähenemä on noin 55 % KIOTO 1:n ja noin 70 % vuoden 2020 tasossa. Taulukossa 25 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 25. Ajoneuvojen ilmastoinnin kylmäainepäästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario 1 (ylikriittinen CO ₂ -järjestelmä)			vähennysskenaario 2 (vuotojen vähentäminen)		
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset		päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset	
			[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]		[Mmk]	[mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	0	0	-	-	0	-	-
2000	45	45	-	-	45	-	-
KIOTO 1	198	80	170	125	85	40	35
2020	209	0	290	94	65	70	27

Nykyisen R-134a-laitteiston hyötysuhteen omaavalla ylikriittisellä hiilidioksidijärjestelmällä saavutettavissa olevat päästövähennykset ovat merkittävät molempina tarkasteluvuosina (taulukko 25). Koska CO₂-järjestelmän tekniikka ei ole vielä kaupallisella tasolla, sisältyy sen käyttöönottoaikatauluun epävarmuutta. Jos oletetaan, että CO₂-laitteisto saadaankin käyttöön vasta vuonna 2008, ei KIOTO 1 -tasossa voida saavuttaa kuin 25 %:n päästövähennys.

Vuotojen vähentäminen vaikuttaa olevan selvästi kustannustehokkaampaa kuin hiilidioksidin käyttö, mutta vastaavasti saavutettavissa oleva päästövähennys on pienempi (kuva 14, taulukko 25). Tiiviyn parantamiseen johtavat toimet ovat kuitenkin teknisesti toteutettavissa jo tällä hetkellä. Esitettyjen tulosten perusteella toimien 1 ja 2 yhdistäminen näyttää olevan varsin suotuisa ratkaisu päästövähennyksiä ajatellen.

4.1.13 Lämpöpumput

4.1.13.1 Yleistä

Lämpöpumput aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 kylmäainepäästöinä karkean arvion mukaan alle 3 kt CO₂-ekvivalenttia (kuvat 15 ja 16) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä. Määrä vastasi noin 1 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja alle 0,004 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000). Pientalojen lämpöpumppujen määrän ennakoidaan kasvavan merkittävästi, ja lisäksi käytössä olevien muiden lämpöpumppujen CFCf ja HCFC-kylmäaineiden korvaus HFC-kylmäaineella on arviolta vasta alkamassa, joten lämpöpumppujen sisältämä kylmäainemäärä muodostunee potentiaaliseksi päästölähteeksi.

Lämpöpumppujen (ks. kohta 4.1.2) käyttöönotto vilkastui 1980-luvulla öljyn hinnan noustua. Niitä otettiin käyttöön pääasiassa rakennusten lämmittämiseksi ja kaukolämmöntuotantoon mutta myös teollisuuden erityissovelluksissa, kuten puutavaran kuivauksessa. Valtaosa käytössä olevista lämpöpumpuista perustuu kompressorikäyttöiseen kylmähöyryprosessiin (Helynen et al. 1999). Teollisuudessa on tosin käytössä myös absorptiolämpöpumppuja kohteissa, joissa hukkalämpöä on käytettävissä. Lämpöpumppujen tehot vaihtelevat pientalojen muutamasta sadasta watista aina kaukolämmöntuotannon useisiin satoihin, jopa tuhansiin kilowatteihin (UNEP 1998b). 1980-luvulla kaukolämmöntuotantoon rakennettiin Suomessa noin kuusi lämpöpumppulaitosta, joista suurin on teholtaan 6 MW (useimmat muutamia satoja kilowatteja). Suomessa oli vuonna 1990 pientaloissa noin 9 000, asuinkerrostaloissa noin 70, liike- ja julkisissa rakennuksissa noin 260 ja teollisuudessa noin 700 lämpöpumppua (Rossi & Hokkanen 1990), jotka on pääasiassa otettu käyttöön 1980-luvun alussa. Suomessa lämpöpumppujen pääasiallisia käyttökohteita ja käytön potentiaalisia lisäämiskohteita ovat pientalot, joita rakennetaan tällä hetkellä noin 10 000 kappaletta vuosittain. Näistä noin puoleen rakennetaan vesikiertoinen lämmitys ja puoleen suorasähkölämmitys (Helynen et al. 1999).

Rakennusten lämpöpumput voidaan jakaa energialähteen perusteella maa-, ilma- ja poistoilmalämpöpumppuihin. Maalämpöpumppu siirtää maahan, kallioon tai veteen varastoituneen energian³⁹ muoviputkessa kiertävän alkoholiseoksen avulla kylmäainepiiriin, josta lämpö ohjataan edelleen kierto- tai käyttöveden energiaksi. Se voidaan siis periaatteessa asentaa kaikkiin omakotitaloihin, joissa on vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä. Maalämpöpumpun lämpökerroin on tavallisesti noin 3 (ILP-tekniikka Oy 1999). Maalämpöpumppu mitoitetaan usein siten, että lämpöpumpun teho on 40–60 % maksimitehosta, jolloin sillä voidaan tuottaa noin 80–95 % rakennusten lämmitystarpeesta (Kaappola 2001). Kylmäaineena käytettiin perinteisesti CFC-12:ta ja HCFC-22:ta, jotka on uusissa asennettavissa pumpuissa korvattu HFC-seoksella R-407C. Kylmäaine täytös on yleensä noin 0,3 kg/kW (UNEP 1998b). Suomessa oli vuoden 1999 alussa käytössä arviolta 7 000–8 000 maalämpöpumppua, jotka on asennettu pääasiassa 1980-luvun alkupuolella (ILP-tekniikka Oy 1999).

Ilmalämpöpumppu käyttää hyväkseen ulkoilmaan sitoutunutta energiaa, joka siirretään ulkoyksikön (kompressorikoneikon) välityksellä kylmäaineeseen ja edelleen sisäyksikön (lauhduttimen) avulla rakennusten sisäilmaan. Ilmalämpöpumpun lämpökerroin on lähes lineaarisesti riippuvainen ulkoilman lämpötilasta. Alle -20...-10 °C:n ulkoilman lämpötiloilla kompressorin käyttöalueen rajat eivät yleensä salli lämpöpumpun käyttöä (Aittomäki et al. 1992). Järjestelmän prosessi voidaan kääntää kuumina aikoina myös toisinpäin, jolloin se toimii ilmastoinnin jäähdytyslaitteena (ks. kohta 4.1.11). Ilmalämpöpumppu on erillinen laitteisto, joka ei ole riippuvainen rakennusten muusta lämmitys- tai ilmastointijärjestelmästä. Se soveltuu kustannusmielessä parhaiten suoräsähkölämmitteeseen taloon, jossa tarvitaan kesäaikana myös ilmastoinnin jäähdytystä. Lämmityssähköstä lämpöpumpulla on mahdollista säästää keskimäärin noin 50 % (Helynen et al. 1999). Kylmäaineena käytettiin perinteisesti R-22:ta (keskimääräinen täytös noin 0,8 kg), joka on uusissa laitteissa korvattu HFC-seoksella R-407C. Suomessa ensimmäiset ilmalämpöpumput otettiin käyttöön 1990-luvun alussa, ja vuoden 2000 alussa käytössä oli noin 2 000–3 000 ilmalämpöpumppua (ILP-Tekniikka Oy 2000, SULPU ry 2000).

Poistoilmalämpöpumppu ottaa nimensä mukaisesti lämpöä talteen rakennuksesta poistettavasta ilmasta ja siirtää energian talon sekä käyttöveden lämmitykseen. Talon sisäilma on suomalaisen ilmastointinormin mukaan vaihdettava kerran kahdessa tunnissa, joten normin mukainen ilmanvaihto on 12 talon tilavuutta vuorokaudessa (ILP-Tekniikka Oy 2000). Ottamalla poistoilmalämpöpumpulla (COP keskimäärin 1,5–2,2) talteen tämän ilmamäärän sisältämää energiaa voidaan lämmityssähköstä säästää noin 40–45 % (ILP-Tekniikka Oy 2000). Kylmäaineena uusissa asennettavissa laitteissa

³⁹ Maalämpö on noin 20 m:n syvyyteen asti aurinkoenergiaa ja sitä syvemmällä radionuklidien hajoamisessa vapautuvaa lämpöä (Helynen et al. 1999).

käytetään R-134a:ta tai R-290:tä (propania). Suomessa oli vuonna 1998 käytössä arviolta 1 000–2 000 poistoilmalämpöpumppua (ILP-tekniikka Oy 1999).

4.1.13.2 Perusskenaario pientalojen lämpöpumpuille

Suomessa asennettiin uusiin pientaloihin vuonna 1999 noin 1 000 uutta lämpöpumppua. Vuosittain käyttöön otettava määrä on kasvanut noin 50–100 % vuodesta 1995 tähän päivään mennessä (SULPU ry 2000). Olettamalla käyttöönoton kasvun jatkuvan nykyisellä tasolla, vuonna 2010 asennettaisiin uusiin taloihin noin 4 000 ja vuonna 2020 noin 7 000 uutta lämpöpumppua. On kuitenkin huomioitava, että lämpöpumpuilla saattaa olla merkittävät markkinat myös olemassa olevien pientalojen saneerauksissa. Esimerkiksi maalämpöpumppu on usein soveltuva korvaamaan käytöstä poistuvia öljykattiloita (noin 25 000 kappaletta vuodessa). Lisäksi Suomessa on yli 500 000 suorasähkölämmitteistä pientaloa (SULPU ry 2000), joiden lämmitysenergian säästöratkaisuna ilmalämpöpumput tulevat todennäköisesti yleistymään. Myös poistoilmalämpöpumppu soveltuu vesikiertoisten lämmitysjärjestelmien uustuotannon lisäksi saneerauksiin.

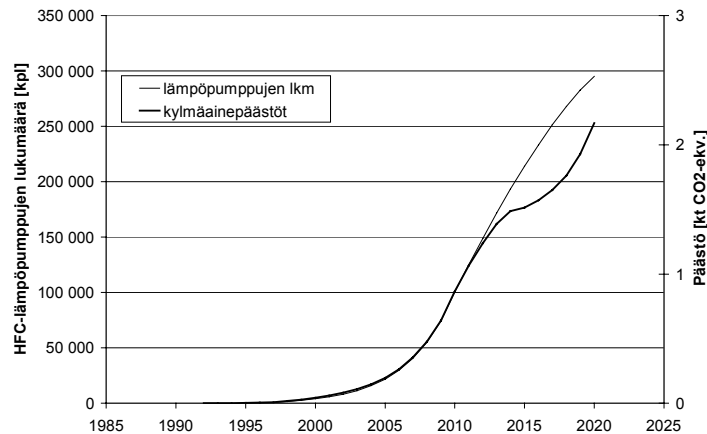
Perusskenaariossa oletettiin lämpöpumppujen vuosittaisen käyttöönoton kasvavan siten, että kauppa- ja teollisuusministeriön tavoitteet uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämiselle vuoteen 2010 ja 2025 mennessä täyttyvät. Tällöin vuonna 2010 tulisi olla käytössä noin 100 000 ja vuonna 2025 noin 300 000 pientalojen lämpöpumppua (Helynen et al. 1999). Tämä määrä saavutetaan, kun käyttöönoton oletettiin kasvavan vuodesta 1999 noin 35 %/a vuoteen 2010 asti, jonka jälkeen kasvun oletettiin hidastuvan noin 3 %/a vuoteen 2025 saakka. Muut perusskenaarion laadinnassa käytetyt oletukset esitetään taulukossa 26.

Taulukko 26. Pientalojen lämpöpumppujen perusskenaarion keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario
laitteiden keskimääräinen täytös	1 kg
uusien laitteiden kylmäaineet vuosina 1995–2020:	
- R-134a	33,3 %
- R-407C	33,3 %
- R-410A	33,3 %
päästökertoimet:	
- asennus	0,6 %
- käyttö	3 %
- käytöstäpoisto	20 %
laitteiden käyttöikä	15 a

Koska käyttöön otettavien erityyppisten lämpöpumppujen osuuksia on vaikea ennustaa, tyydyttiin skenaariossa arvioimaan käyttöönotettavien laitteiden kokonaismäärää. Kylmäainetäytökseksi arvioitiin 1 kg laitetta kohden (taulukko 26). Asennettavien

laitteiden kylmäaineen arvioitiin koostuvan tasaisesti R-407C:stä, R-134a:sta ja R-410A:sta. Näiden kylmäaineiden GWP_{100} -arvot ovat 1 300–1 730, joten keskimääräinen GWP_{100} -arvo (1 520) kuvaa joka tapauksessa varsin hyvin asennettavien kylmäaineiden lämmityspotentiaalia, vaikka näiden kylmäaineiden suhteelliset osuudet muuttuisivat runsaastikin. Pientalojen lämpöpumppujen HFC-päästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 15.



Kuva 15. Perusskenaario pientalojen lämpöpumppujen käytössä olevalle lukumäärälle ja HFC-kylmäainepäästöille.

Perusskenaariossa oletetulla lämpöpumppujen käyttöönottomäärällä olisivat pumpuista aiheutuvat HFC-päästöt vuonna 2010 noin 1 ja vuonna 2020 noin 2 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 15). Oletetaan kauppa- ja teollisuusministeriön uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman ympäristövaikutusten arvioinnin (Tuhkanen & Pipatti 1999) mukaisesti, että lämpöpumpuilla korvataan 80-prosenttisesti ostosähköä ja 20-prosenttisesti öljylämmitystä. Lisäksi oletetaan, että vuosina 2010 ja 2020 käytössä oleva lämpöpumppukapasiteetti on jakautunut tasan maa-, ilma- ja poistoilma-lämpöpumppujen kesken. Tällöin yhden lämpöpumpun tyypillisen omakotitalon lämmittämiseen (energiantarve 20 000 kWh/a) tarvitsema ulkopuolisen energian määrä on keskimäärin noin 9 200 kWh/a (ks. Tuhkanen & Pipatti 1999). Lämpöpumpulla saavutettava keskimääräinen päästösäästö on noin 2,9 t CO₂-ekvivalenttia vuodessa. Näin ollen vuosien 2010 ja 2020 lämpöpumppukapasiteeteilla saavutettava päästövähennys muussa energiantuotannossa olisi noin 0,3 ja 0,9 Mt CO₂-ekvivalenttia. Kylmäainepäästöt alentavat tätä vähennystä alle 0,5 %.

Koska pientalojen lämpöpumput ovat varsin tiiviitä, on suurin päästöjen hallintahuomio kiinnitettävä laitteiden käytöstäpoiston yhteyteen. Perusskenaariossa on oletettu, että käytöstä poiston yhteydessä suoritetaan kylmäaineen talteenotto (80 %:n hyötysuhteella). Mikäli talteenottoa ei toteuteta lainkaan, ovat pientalojen lämpöpumpuista aiheutuvat päästöt KIOOTO 1 -tasossa noin 1 ja vuonna 2020 noin 10 kt CO₂-ekviva-

lenttia. Lämpöpumpuilla saavutettava muun energiantuotannon päästövähennys on niin suuri, ettei tälläkään oletus juuri muuta saavutettavaa kokonaispäästövähennystä.

4.1.13.3 Perusskenaario muille lämpöpumpuille

Pientalojen lisäksi lämpöpumppuja on Suomessa käytössä myös suuremmissa rakennuksissa sekä kaukolämmöntuotannossa ja teollisuudessa. Tällaisten HFC-kylmäaineella toimivien laitteiden ja laitosten lukumääristä ei tällä hetkellä ole tietoa. Lisäksi absorptiolämpöpumppujen ja esimerkiksi teollisuuden prosessivettä, hiilivetyjä tai ammoniakkia kylmäaineenaan käyttävien lämpöpumppujen määriä halogenoituja kylmäaineita käyttäviin verrattuna on hankala arvioida. Myöskään CFC- ja HCFC-yhdisteillä toimivien lämpöpumppujen korvautumisnopeutta HFC-yhdisteillä ei ole tiedossa, joten HFC-kylmäainepäästöjen arviointi tällaisista lämpöpumpputyypeistä on vaikeaa.

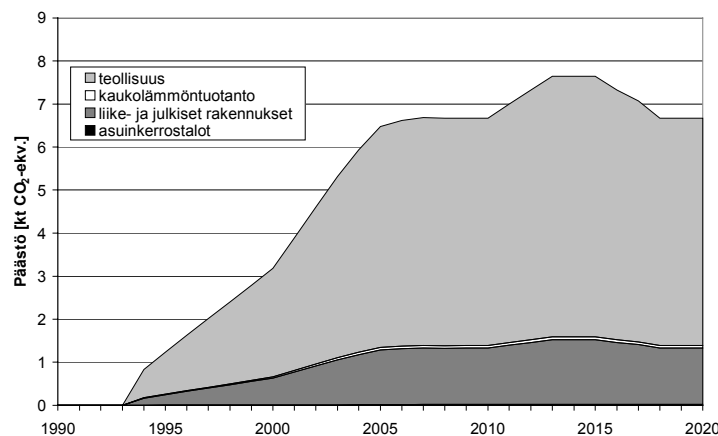
Koska muiden kuin pientalojen lämpöpumppujen määrät pysyivät kohtuullisen vakiona vuosittain, lähdettiin perusskenaariossa liikkeelle vuonna 1990 käytössä olleista lämpöpumppujen lukumääristä, joiden oletettiin pysyvän vakiona koko tarkastelujakson ajan. Rossin & Hokkasen (1990) mukaan lämpöpumppujen kylmäaineena oli vuonna 1990 yleensä R-22. Perusskenaariossa oletettiin kaikkien lämpöpumppujen toimivan halogenoituilla yhdisteillä siten, että CFC- ja HCFC-kylmäaineiden korvautuminen HFC-yhdisteillä arvioitiin tapahtuvan lineaarisesti vuosien 1994 (0 %) ja 2008 (100 %) välillä. Perusskenaarion laadinnassa käytetyt keskeisimmät parametrit esitetään taulukossa 27.

Taulukko 27. Muiden (kuin pientalojen) lämpöpumppujen perusskenaarion keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario			
	asuinkerrostalot	liike- ja julkiset rakennukset	kaukolämmön - tuotanto	teollisuus
käytössä olevat laitteet ja laitokset	70 kpl	260 kpl	6 kpl	700 kpl
laitteiden ja laitosten keskimääräinen täytös	5 kg	50 kg	100 kg	75 kg
asennetut HFC-kylmäaineet:				
- R-134a	33,3 %	33,3 %	33,3 %	33,3 %
- R-407C	33,3 %	33,3 %	33,3 %	33,3 %
- R-410A	33,3 %	33,3 %	33,3 %	33,3 %
päästökertoimet:				
- asennus	0,6 %	1 %	1 %	1 %
- käyttö	3 %	5 %	5 %	5 %
- käytöstäpoisto	20 %	20 %	20 %	20 %
laitteiden ja laitosten käyttöikä	15 a	10 a	10 a	10 a

Asuinkerrostalojen lämpöpumppujen oletettiin olevan teknisesti hyvin samankaltaisia pientalojen lämpöpumppujen kanssa, joten päästökertoimet ja käyttöiät pidettiin

yhtäläisinä (taulukko 27). Suurempien lämpöpumppulaitteiden ja -laitosten arvioitiin kestävän hieman lyhyemmän ajan ja lisäksi niiden asennuksen ja käytön aikaisten päästöjen arvioitiin olevan hieman suuremmat kuin pien- ja asuinkerrostalojen lämpöpumpuilla (taulukko 27). Koska HFC-kylmäaineiden käyttöönoton alkamisajankohta sekä CFC- ja HCFC-yhdisteiden korvautumisnopeus ovat näissä sovelluksissa varsin epävarmoja, tasattiin perusskenaarion vuosittaisia päästöjä käyttämällä viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa. Muiden kuin pientalojen lämpöpumppujen HFC-kylmäainepäästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 16.



Kuva 16. Muiden (kuin pientalojen) lämpöpumppujen HFC-kylmäainepäästöjen perusskenaario.

Arvion mukaan muut kuin pientalojen lämpöpumput aiheuttavat Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020 hieman alle 7 kt:n CO₂-ekvivalenttia suuruisen kylmäainepäästön. Laitteiden käytöstäpoisto nostaa päästöjä tarkasteluajankohtien välillä noin 1 kt:n CO₂-ekvivalentilla (kuva 16). Päästöt aiheutuvat enimmäkseen teollisista sekä vähäisemmissä määrin liike- ja julkisten rakennusten lämpöpumpuista. Asuinkerrostalojen ja kaukolämpöpumppujen päästöt ovat arviolta merkityksettömän vähäiset (kuva 16).

Kuvassa 16 esitettyyn skenaarioon sisältyy kuitenkin suurta epävarmuutta muun muassa käytettävien kylmäaineiden ja tekniikoiden sekä keskimääräisten täytösten suhteen. Koska suurin osa päästöistä aiheutuu teollisista lämpöpumpuista, saattaa teollisuudessa käytössä olevilla absorptiolämpöpumppujen ja HFC-yhdisteille vaihtoehtoisten kylmäaineiden todellisilla osuuksilla olla merkittävä skenaarion päästöjä alentava vaikutus. Suuret lämpöpumppulaitokset tosin saattavat vuotaa selvästi enemmän kuin oletetun 5 % vuodessa, joten edellä mainitut epävarmuudet kumoavat osittain toisiaan.

4.1.13.4 Päästövähennysmenetelmät

Pienissä lämpöpumpuissa voidaan HFC-kylmäaineiden sijasta usein käyttää hiilivetyjä. Lisäksi hiilidioksidin käyttöä tutkitaan. Suuremmissa yksiköissä osa HFC-yhdisteiden käytöstä on todennäköisesti korvattavissa ammoniakilla ja hiilivedyillä sekä absorptiolämpöpumpuilla. Koska tällaisista käyttökohteista ei ole tarkempia tietoa ja lämpöpumpujen kylmäainepäästöt ovat arvioiden mukaan verrattain vähäiset, ei päästövähennysskenaariota esitetä tässä työssä.

4.2 Solumuovit ja saumaeriste

4.2.1 Yleistä

Solumuovien ponneaineet (muiden kuin saumaeristeiden) aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 arviolta noin 2 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 18) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat alle 1 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,002 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Solumuovit valmistetaan erilaisilla prosesseilla paisuttamalla tietty polymeeri sopivaan koostumukseen. Polyuretaanien valmistuksessa polymeeri muodostuu yleensä samanaikaisesti seoksen paisumisen ja sitkistymisen kanssa. Paisunta saadaan aikaan niin sanotun vaahdotusaineen (ponneaineen) avulla, joka muuttuu kemiallisen tai fysikaalisen reaktion seurauksena nesteestä kaasuksi (Tammela 1990). Solumuovit voidaan jakaa avo- ja umpisoluisiin. Avo- eli tyhjäsoluisista muoveista ponneaine vapautuu lähes kokonaan valmistuksen yhteydessä, kun taas umpisoluisien solukoista se voi diffundoitua hitaasti jopa useiden kymmenien tai satojen vuosien aikana. Ponneaineen diffundoitumisnopeus vaihtelee itse ponneaineen lisäksi useasta muusta tekijästä riippuen.

Solumuovien ponneaineena käytettiin aiemmin paljon CFC-yhdisteitä, pääasiassa CFC-11:ta ja CFC-12:ta (UNEP 1998a). Sovelluskohteita olivat erilaiset kovat, joustavat ja muut polyuretaanit, fenolimuovit, polyolefiinit sekä suulakepuristettu polystyreeni. 1990-luvun alussa CFC-yhdisteiden käyttöä ruvettiin rajoittamaan, jolloin niiden korvaajiksi tulivat pääasiassa HCFC-yhdisteet mutta myös muun muassa hiilivedyt ja hiilidioksidi. Suomessa hiilivedyt ja hiilidioksidi korvasivat valtaosan CFC-yhdisteiden kulutuksesta solumuovien valmistuksessa vuoteen 1994 mennessä. Osa valmistajista siirtyi CFC-kiellon voimaantultua (VNp 677/1993) kuitenkin käyttämään HCFC-141b:tä tai HCFC-22/HCFC-142b-seosta. HCFC-yhdisteiden käyttö ponneaineena solumuovien valmistuksessa kiellettiin 1.1.2000 alkaen (VNp 262/1998).

HCFC-yhdisteitä korvaavia punneaineita on lukuisia. Edellä mainittujen hiilidioksidin ja hiilivetyjen lisäksi käytetään HFC-yhdisteitä. Tällä hetkellä HFC-yhdisteistä ovat käytössä HFC-134a ja HFC-152a. HFC-245fa:n ja HFC-365mfc:n odotetaan kaupallistuvan vuoden 2002 aikana (Williams 2000, Solvey 2001). Kumpaakin uutta punneainetta tuotetaan jo koemittakaavassa. Niitä on ollut saatavilla myös pieniä eriä solumuovieristeiden valmistajien tuotekehitystarkoituksiin. Punneaineiden valmistajat eivät ole suostuneet paljastamaan uusien tehtaittensa tuotantokapasiteettia, joten näiden kemikaalien saatavuutta esimerkiksi vuonna 2003 on vaikea arvioida.

HFC-yhdisteillä valmistettavat tuotteet ovat olleet pääasiassa sovelluksia, joissa tuotteen lämmönjohtokyvyn on oltava mahdollisimman pieni, eikä suuria poikkeavuuksia CFC- tai HCFC-yhdisteillä vaahdotettuihin haluta. Syntyvän solumuovin pinnanlaatu tai turvallisuustekijät saattavat myös joissakin tapauksissa olla kriteerinä HFC-yhdisteiden käytölle. Muissa sovelluksissa pystytään jo varsin tehokkaasti käyttämään esimerkiksi hiilivety- tai CO₂-tekniikoita (Little 1999). Liitteessä H esitetään yleisesti maailman muoviteollisuudessa käytettyjen CFC-yhdisteiden vaihtoehtoiset punneaineet sovelluskohteittain. Suomessa valmistettavissa sovelluksissa HFC-yhdisteitä käytetään tietyvästi vain erilaisten kovien polyuretaanieristeiden valmistuksessa ja saumaeristeen punneaineena (Pullola 2000). Vähäisiä määriä saatetaan myös käyttää joidenkin erikoisten puolikovien polyuretaanisolumuovien valmistuksessa (ei eristystarkoituksiin). Polyuretaanisovellusten ja HFC-yhdisteiden käytön ennakoidaan kasvavan lähivuosina, mikäli uudet korkean kiehumispisteen ja hyvän eristyskyvyn omaavat HFC-245fa ja HFC-365mfc saavuttavat kaupallisen suosion. Näitä yhdisteitä on tarjottu koekäyttöön myös suomalaisille solumuovien valmistajille (Pullola 2000). Arvioiden mukaan ne soveltuvat käytettäväksi kaikkien kovien polyuretaanien ja integraalisolumuovien vaahdotukseen (liite H, taulukko H-1), joten lähitulevaisuudessa käytettävään teknologiaan liittyy paljon epävarmuutta. On jopa mahdollista, että nyt halogenoiduille yhdisteille vaihtoehtoisia punneaineita käyttävät valmistajat investoivat uuteen HFC-teknologiaan, mikäli siitä seuraa yrityksen tuotteille merkittävää kilpailuetua. Suulakepuristettu polystyreeni (XPS = extruded polystyrene) vaahdotetaan Suomessa nykyään hiilidioksidilla (Oinonen 2000).

4.2.2 Vaahdotusaineet

Polyuretaanin valmistusprosessissa polyoli reagoi isosyanaatin kanssa. Prosessi on eksoterminen ja syntyvä lämpö höyrystää punneaineen, joka vaahdottaa syntyvän polyuretaanin (Tammela 1990). Käytettävällä punneaineella on suuri merkitys syntyvän solumuovin laatuun. Prosessin hallinnan kannalta punneaineen kiehumispisteen tulisi olla lähellä ympäristön lämpötilaa tai mieluummin hieman sen yläpuolella. Punneaineen hyvä liukenevuus syntyviin solukoihin on puolestaan hyvin oleellista umpisoluisille

eristysvaahdoille, joiden tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa alhainen lämmönjohtavuus, hyvä dimensionaalinen stabiliteetti ja palamattomuus (Jeffs 2000). Käytettävä ponneaine ei saa olla otsonikerrokselle haitallista, se ei saisi olla myrkyllistä eikä syttyvää ja sen GWP-arvon tulisi olla mahdollisimman alhainen. Kaikkien näiden ehtojen toteutuminen tunnetuilla ponneainevaihtoehdoilla on hyvin vaikeaa. Liitteessä H (taulukko H-1) esitetään polyuretaanin vaihtoehtoisten ponneaineiden ominaisuuksia. Tällä hetkellä saatavilla ja lähitulevaisuudessa odotettavissa olevia, otsonia tuhoavien yhdisteiden vaihtoehtoisia ponneaineita ovat hiilivedyt, hiilidioksidi ja HFC-yhdisteet.

4.2.2.1 Hiilivedyt

Hiilivetyjä (pääasiassa pentaania) on otettu käyttöön lähes kaikkien solumuovityyppien vaahdotuksessa (liite H, taulukko H-1). Osa valmistajista on siirtynyt niiden käyttöön suoraan CFC-yhdisteistä. Siirtyminen palamattomien halogenoitujen yhdisteiden käytöstä palavien hiilivetyjen käyttöön aiheuttaa prosessiin merkittäviä muutoksia muun muassa turvallisuussyistä. Hiilivetyjen määrä tehtaassa on minimoitava erikoispumppujen ja turvallisen välimatkan päähän sijoitettavan varaston avulla. Polyuretaanivaahtojen valmistus on eksoterminen prosessi, jonka hallinnalla on estettävä hiilivetyjen syttyminen. Turvajärjestelmät sisältävät myös erilaiset hälytys-, henkilöstönkoulutus- ja tarkastuskäytännöt. Nämä järjestelmät ja käytännöt nostavat investointi- ja käyttökustannuksia, jotka saattavat nousta liian suuriksi etenkin pienten valmistajien kohdalla.

Pentaanilla paisutetun lopputuotteen palo-ominaisuudet riippuvat sovelluksesta. Esimerkiksi PU-levyjen ja elementtien syttyvyydessä ei ole havaittu merkittävää turvallisuusriskin kasvamista, kun taas saumaeriste syttyy huomattavasti helpommin (Pullola 2000). Pentaanilla paisutetun umpisolueristeen lämmöneristyskyky on tutkimusten mukaan yleensä noin 10 % huonompi kuin vastaavan HFC-134a-tuotteen, mikä johtaa lisääntyvään materiaalin kulutukseen (Johnson & Haworth 1999, Harnisch & Hendriks 2000, Pedersen 1998). Toisaalta pentaania tarvitaan yleensä vähemmän ja se on lisäksi halvempaa kuin HFC-134a (Pullola 2000). Pentaanilla paisutetun vaahdon muodostuminen sen sijaan ei ole yleensä yhtä tasaista kuin sopivilla halogenoiduilla yhdisteillä paisutettu vaahdo (Pullola 2000).

4.2.2.2 Hiilidioksidi CO₂

Teknisesti hiilidioksidia voidaan käyttää lähes kaikkien solumuovityyppien vaahdotusaineena. Polyuretaania voidaan tehdä niin sanotulla vesivaahdotekniikalla, jossa vesi reagoi isosyanaatin kanssa tuottaen hiilidioksidia, joka paisuttaa syntyvän polymeerin (Öko-Recherche 1999). Hiilidioksidi diffundoituu kuitenkin myös umpisoluisista polyuretaaneista jo muutamassa vuorokaudessa ja korvautuu ilmalla sekä muilla ilmakehän kaasuilla. Tällöin tuotteen eristyskyky huononee merkittävästi. Hyvän eristyskyvyn saamiseksi hiilidioksidin lisäksi onkin yleensä käytettävä jotain solukossa paremmin pysyvää ponneainetta, kuten HFC-134a:ta (Öko-Recherche 1999).

Myös suulakepuristettu polystyreeni (XPS) voidaan vaahdottaa hiilidioksidilla. Prosessissa valmis polymeeri (polystyreeni) sulatetaan ekstruuderilla ja sulaan massaan syötetään ponneaine, joka vaahdottaa polystyreenin ekstruuderin suuttimesta ulos tultaessa paineen alentumisen seurauksena (Tammela 1990). XPS:n valmistuksessa hiilidioksidia ei siis voida tuottaa kemiallisella reaktiolla, vaan se on tuotava prosessiin nestemäisenä (Öko-Recherche 1999). CO₂:lla vaahdotettujen XPS-levyjen lämmöneristyskyky on tavallisesti 18–27 % huonompi kuin HFC-134a:lla vaahdotettujen, riippuen levyn paksuudesta (liite H, taulukko H-4).

4.2.2.3 HFC-yhdisteet ja seokset

HFC-yhdisteistä solumuovien ponneaineena ovat kaupallisessa käytössä HFC-134a ja HFC-152a (liite H, taulukko H-1). Viimeksi mainitun käyttö rajoittuu lähinnä kohteisiin, joissa ponneaineen ei oleteta pysyvän syntyvän muovin solukoissa (saumaeristeet, integraalivaahdot). Lisäksi HFC-152a:ta käytetään XPS-levyjen vaahdotuksessa (ei Suomessa) apuponneaineena hyvän liukenevuutensa ansiosta (Öko-Recherche 1999).

Markkinoille on tulossa myös kaksi uutta HFC-yhdistettä (HFC-245fa ja HFC-365mfc)⁴⁰, joita valmistetaan jo pilottimittakaavan tehtaissa, ja niitä on saatavilla pieniä määriä koekäyttöön. Täyden mittakaavan tuotannon odotetaan käynnistyvän vuoden 2002 kuluessa.

HFC-yhdisteiden käytössä ollaan menossa yhä enemmän seosten suuntaan. HFC-245fa:n valmistajan mukaan sovelluksissa, joissa hyvä eristyskyky on tärkein tekijä, voidaan käyttää pelkästään HFC-245fa:ta (Williams 2000). Mikäli alhaisempi eristyskyky ja ponneaineen syttyvyys ovat hyväksyttäviä, voidaan käyttää HFC-245fa:n

⁴⁰ IPCC (1996) ei ole määritellyt GWP₁₀₀-kertoimia näille yhdisteille (ks. liite A).

ja hiilivetyjen seosta, jolloin tuotantokustannuksia voidaan alentaa. Mikäli alhaisempi eristyskyky on hyväksyttävää, mutta punneaineen tulee olla palamatonta, voidaan käyttää HFC-245fa:n ja veden seosta. Erilaisten seosten avulla voidaan valmistaa tuotteita, jotka täyttävät juuri tietyssä sovelluksessa vaadittavat ominaisuudet (Williams 2000). HFC-365mfc:n valmistaja mainitsee myös vastaavin kriteerein lukuisia punneainevaihtoehtoja⁴¹.

4.2.3 Sovelluskohteet

Kovaa polyuretaania käytetään maailmanlaajuisesti eniten kotitalouksien kylmälaitteiden eristämiseen. Suomessa tällä hetkellä markkinoilla olevissa laitteissa eristys on vaahdotettu joko HFC-134a:lla (noin 23 %:ssa laitetyppeistä) tai pentaanilla (noin 77 %:ssa). Suomalaisista kodinkylmälaitteiden valmistajista (3 kpl) kaksi vaahdottaa eristysen HFC-134a:lla (Adato 2000). Pentaani on viime vuosina vallannut markkinoita HFC-134a:lta etenkin Pohjois-Euroopassa (Öko-Recherche 1999).

Kovaa polyuretaania käytetään merkittävästi myös erilaisten rakenteiden eristämiseen. Siitä valmistetaan erilaisia lämmöneristyslevyihioita, laminaatteja ja sandwich-elementtejä (liite H, taulukko H-1). Tällaisia tuotteita käytetään muun muassa kylmä- ja vähittäisliikkeiden, kylmähuoneiden, kylmäkuljetusajoneuvojen, tehtaiden sekä laivojen rakenteiden eristämiseen. Suomessa valmistettavat tuotteet vaahdotetaan joko pentaanilla tai HFC-134a:lla. Lisäksi kovaa polyuretaania myydään niin sanottuna saumaeristeenä, jota jaellaan aerosolipulloissa. Saumaeristeiden vaahdotusprosessissa ei synny läheskään niin paljon umpisoluja kuin esimerkiksi eristyslevyjen yhteydessä, joten punneaine ei juurikaan jää soluihin lämmöneristeeksi (Pullola 2000). Punneaineena käytetään tavallisesti propaania, butaania tai dimetyylieetteriä sekä näiden ja HFC-134a:n tai HFC-152a:n seosta (Öko-Recherche 1999). Sekoittamalla HFC-yhdisteitä (erityisesti HFC-152a:ta) punneaineeseen varmistetaan parempi vaahtoavuus, etenkin alle +5 °C:n lämpötiloissa. HFC-134a:ta käytetään myös parempien palo-ominaisuuksien saavuttamiseksi (Pullola 2000). Suomessa on yksi saumaeristettä valmistava yritys. Se tuottaa noin 4–5 miljoonaa tuotepulloa vuodessa, joista noin 2 miljoonaa sisältää HFC-yhdisteitä (Pullola 2000).

Suomessa polyuretaanin osuus koko lämmöneristemarkkinoista on vajaat 10 %. Muita tuotteita ovat XPS-levyt sekä polyuretaanin kanssa kilpailevat villa- ja styrox-levyt (EPS). Rakennuspolyuretaaniteollisuus kuitenkin uskoo, että polyuretaanin osuutta

⁴¹ Syklopentaani-vesi, HFC-365mfc, HFC-365mfc-syklopentaani, vesi, HFC-134a-vesi, HFC-365mfc-HFC-134a, HFC-365mfc-HFC-245fa, HFC-245fa, HFC-365mfc-pentaani (Solvey 2001)

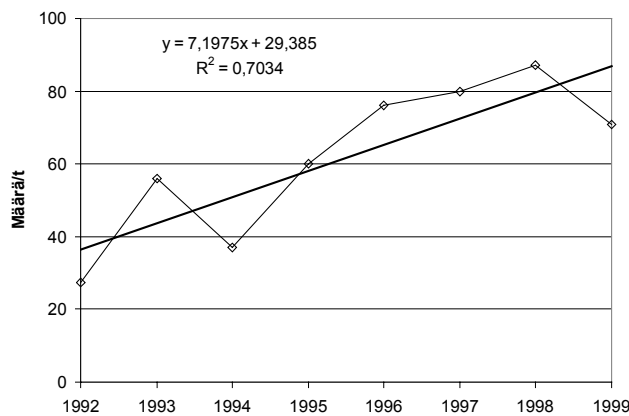
voidaan tulevaisuudessa kasvattaa muun muassa tuotekehityksen tuloksena (Pullola 2000).

HFC-134a:lla ja HFC-152a:lla vaahdotetaan myös joitain erikoisia integraalisolumuoveja, joiden pinnanlaatu täytyy turvallisuussyistä olla riittävän hyvä (esimerkiksi ajoneuvojen ohjauspyörät) (UNEP 1998a). Tietävästi myös urheilujalkineiden pohjien (Öko-Recherche 1999) ja puujäljitelmiä (Harnisch & Hendriks 2000) vaahdotuksen apuaineena käytetään HFC-134a:ta. Näiden sovellusten HFC-yhdisteiden kulutusmäärät ovat kuitenkin hyvin pieniä verrattuna eristyssovelluksiin. HFC-yhdisteiden käytöstä integraalisolumuovien vaahdotukseen Suomessa ei ole tietoa. HFC-245fa:n tuottaja ilmoittaa ponneaineen soveltuvan kaikkien kovien ja integraalisolumuovisovellusten valmistukseen, joten tulevaan teknologiaan liittyvä epävarmuus on suuri.

4.2.4 Perusskenaario

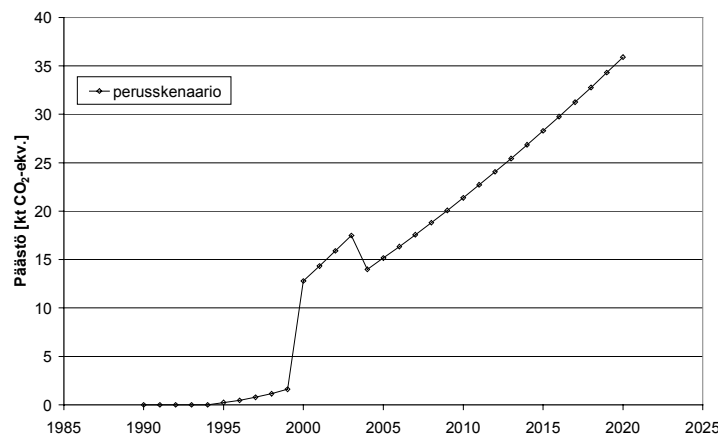
Suomessa käytettiin vuonna 1999 vajaat 2 tonnia HFC-134a:ta solumuovien vaahdotukseen (Ympäristöministeriö 2000). Tämän lisäksi HFC-134a:ta ja HFC-152a:ta käytettiin saumaeristeiden ponneaineena, mutta toiminnanharjoittajien vähäisyyden vuoksi käyttömäärätiedot ovat luottamuksellisia. Saumaeristeistä arvioidut päästöt esitetään erittelemättöminä yhdessä teknisten aerosolien kanssa kohdassa 4.3.3.

HFC-yhdisteiden käyttö solumuovien valmistuksessa on ollut vähäistä (Suomessa alle 10 % HCFC-141b:n käyttömäärästä vuonna 1998). HFC-kulutuksen odotetaan kuitenkin kasvavan, koska solumuovien valmistus HCFC-yhdisteillä on ollut kielletty vuoden 2000 alusta lähtien. HCFC-141b:n vuotuiset kulutusmäärät solumuovien valmistukseen on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. HCFC-141b:n vuotuiset käyttömäärät solumuovien valmistuksessa Suomessa.

Tilanteen muuttumista on vaikea ennustaa, koska HFC-yhdisteet eivät ole ainoita mahdollisia korvaajia HCFC-141b:lle. Myös ennakoitu seosponneaineiden käyttö hankaloittaa arviointia. Perusskenaariossa lähdettiin liikkeelle HCFC-141b:n kulutuksesta vuosina 1992–1999 ja oletettiin vaahdotusainekulutuksen kasvun jatkuvan havaitun noin 7,2 t:n/a verran. Lisäksi oletettiin Ashfordin (1999) tavoin, että HFC-245fa ja HFC-365mfc muodostavat 100 % (suhteessa 50-50)⁴² tästä kulutuksesta vuodesta 2004 eteenpäin. Siirtymävaiheessa (2000–2003) HCFC-141b:n käytön oletettiin korvautuvan 100-prosenttisesti HFC-134a:lla⁴³. Kaikki HFC-yhdisteet oletettiin käytettävän eristystarkoituksiin valmistettaviin solumuoveihin, joista HFC-yhdisteet diffundoituvat hitaasti. Valmistuksen päästökertoimenä käytettiin 10 %:a ja käytön aikaisena vastaavasti 0,5 %:a. Koska tuotteiden keskimääräinen käyttöikä on pitkä (noin 50 vuotta), arvioitiin käytöstäpoiston päästöt alkavan esiintyä vasta vuoden 2020 jälkeen. Solumuovien perusskenaario esitetään kuvassa 18.



Kuva 18. Perusskenaario HFC-yhdisteiden päästöille solumuovien valmistuksesta ja käytöstä.

Perusskenaariossa havaittava nopea päästövähennys vuosina 2003–2004 johtuu arvioidusta nopeasta siirtymisestä HFC-134a:n käytöstä uusiin HFC-yhdisteisiin (ero GWP₁₀₀-arvossa). Skenaarion suurin epävarmuus liittyy vuosien 2000–2003 aikana tapahtuvaan HCFC-141b:lle arvioidun näennäisen kulutuksen korvautumiseen ja seosponneaineiden käyttöön. Osuus, jolla hiilivedyt korvaavat HCFC-141b:lle ennakoitua näennäistä kulutusta, vähentää skenaarion vastaavan osuuden HFC-yhdisteille arvioiduista päästöistä.

⁴² Uusien HFC-yhdisteiden keskimääräisen GWP₁₀₀-arvon oletetaan olevan 900 (ks. liite A)

⁴³ Ponneaineen määrä eristeen valmistuksessa optimoidaan huomioiden lukuisia tekijöitä. Tuotteen lopullisten ominaisuuksien lisäksi tällaisia ovat mm. ponneaineen liukoisuus polyoliin ja valmistuskustannukset. Erään kemikaalivalmistajan tekemän tutkimuksen perusteella kylmälaitteiden eristeen valmistuksessa voidaan käyttää suunnilleen saman verran HFC-134a:ta kuin HCFC-141b:tä, jolloin ponneaineen osuus on noin 10 % valmiin eristeen massasta (Wheeler et al. 2000)

4.2.5 Päästövähennysmenetelmät ja -kustannukset

Koska HFC-yhdisteillä vaahdotettavia solumuoveja käytetään pääasiassa lämmön-eristeinä, on tuotteilla oltava mahdollisimman pieni lämmönsiirtokerroin koko tarkoituksenmukaisen käyttöajan ajan. Vaihtoehtoisia eristysmateriaaleja tai halogeeniomattomia ponneaineita käytettäessä sovellusten eristyskyky yleensä huononee (tai kustannukset kasvavat runsaasti), jolloin eristyspaksuutta on kasvatettava tai sovelluskohteiden energiankulutus kasvaa. Eristeiden käyttöikä on yleensä niin pitkä, että pienikin lisäys energiankulutuksessa johtaa helposti kokonaispäästöjen kasvuun, vaikka varsinaisen eristeen suora päästövaikutus pienenisikin. Siksi vaihtoehtoisilla tekniikoilla tai ponneaineilla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä yleensä ainoastaan sellaisissa kohteissa, joissa eristyskyky saadaan säilymään yhtäläisenä vertailukohteen kanssa. Tavallisesti tämä tapahtuu eristyspaksuutta tai -tiiviyttä kasvattamalla. On huomioitava, että soveltamalla vastaavaa ajattelutapaa myös HFC-ponneaineella vaahdotettuihin tuotteisiin – kasvattamalla HFC-yhdisteellä paisutettavan eristeen paksuutta – saavutetaan jälleen parempi eristysominaisuus kuin vaihtoehtoisella ponneaineella vaahdotetun suuremman lämmönsiirtokertoimen omaavalla tuotteella. Eristyspaksuuden kasvattaminen ei siis välttämättä anna oikeaa kuvaa ponneaineen vaihdolla saavutetavasta kokonaispäästövähennyksestä.

Eristeen aiheuttaman kokonaiskasvihuonekaasupäästön voidaan ajatella sisältävän myös itse tuotteen valmistuksen lisäksi raaka-aineiden valmistuksesta syntyvät päästöt, ja mikäli aikaperspektiiviä kasvatetaan, myös tuotteen käytöstäpoiston yhteydessä syntyvät päästöt. Tällöin jouduttaisiin arvioimaan muun muassa erilaisten yksikköoperaatioiden energiankulutuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt, jotka riippuvat tuotantoprosessin lisäksi myös jätteenkäsittelyprosessista. Kuvatun kaltainen elinkaari-analyysi ylittäisi yksityiskohtaisuudessaan huomattavasti tämän projektin tavoitteet mutta kuvaa selvästi kokonaispäästöjen arviointiin liittyvää monitahoisuutta. Joidenkin tehtyjen elinkaari-analyyysien perusteella näyttää siltä, että eristeiden kohdalla HFC-yhdisteiden käyttö saattaa olla ympäristöystävällinen vaihtoehto, jos ponneaine otetaan talteen eristeestä käytöstäpoiston yhteydessä (esim. Krähling & Zipfel 2000).

HFC-yhdisteillä vaahdotettujen polyuretaanieristeiden korvaaminen muilla tekniikoilla on mahdollista, mutta tällöin joudutaan eräiden ongelmien eteen. Yleisesti vaihtoehtoisten tekniikoiden (esim. vuorivillan, lasikuidun) eristyskyky on huonompi (Liite H, taulukko H-3), mikä johtaa eristyspaksuuden kasvattamiseen. Joissakin tapauksissa eristyspaksuuden lisäys voi johtaa jopa tukimateriaalien tarpeeseen, jolloin eristykseen käytetty paino kasvaa ratkaisevasti. Myös kosteuden estokyky on vaihtoehtoisilla tekniikoilla yleensä polyuretaaneja huonompi ja lisäksi saattaa aiheuttaa kuituhaittoja. Mikäli nämä vaatimukset voidaan täyttää ja rajoitteet eivät muodostu esteeksi, on polyuretaanien korvaaminen mahdollista. Sovellettavuus riippuu kuitenkin

täysin tilanteesta, ja suurin osa sovelluskohteista todennäköisesti sisältyy jo polyuretaaneille vaihtoehtoisen tekniikan markkinaosuuteen (noin 90 %).

Tyhjöpaneelit ovat eristysominaisuuksiltaan erinomaisia vaihtoehtoja polyuretaanieristeille. Niitä on kehitetty useilla erilaisilla kuori- ja täyttömateriaaleilla. Tyhjöpaneeleilla on saavutettu jopa 20 %:n energiansäästö parhaisiin polyuretaaneihin (CFC-yhdisteillä vaahdotettuihin) verrattuna (UNEP 1998a). Yhdysvalloissa tyhjöpaneeleita on käytössä pääasiassa kylmälaitteiden eristeinä (Sand & Fischer 1997). Rakennusten eristämiseen niitä on perinteisesti pidetty liian kalliina, mutta uusia halvempia versioita on kehitetty ja ne saattavat olla tulevaisuudessa potentiaalisia vaihtoehtoja. Tosin arvioiden mukaan kattojen ja lattioiden eristämisessä ne eivät tule syrjäyttämään umpisoluvaahtoja, mikä johtuu tyhjöpaneelien huonommista puristuslujuus- ja kosteudenesto-ominaisuuksista (Little 1999). Tarkempia arvioita sovelluskohteista, eristysominaisuuksista tai kustannuksista ei ollut saatavilla.

Polyuretaani voidaan vaahdottaa HFC-yhdisteiden sijasta myös hiilivedyillä (erityisesti pentaanilla). Sovelluksissa, joissa vaahdo puristetaan todella tiiviiksi (esim. kaukolämpöputkissa), ei eristyskyvyssä ole eri vaahdotusaineiden välillä juurikaan eroa. Rakennusten ja kylmälaitteiden eristykseen käytettävien hiilivedyillä vaahdotettujen tuotteiden lämmönsiirtokerroin saattaa kuitenkin olla suurempi kuin HFC-yhdisteillä, jolloin eristyspaksuutta on kasvatettava. Uusimpien arvioiden mukaan kaupallisesti saatavilla tai tutkimuskohteena olevilla syklo- tai syklo-isopentaanilla vaahdotetuilla kovilla polyuretaaneilla saavutetaan noin 2,5–3 % paremmat eristysominaisuudet tavallisissa kylmälaitteissa kuin HFC-134a:lla (Williams et al. 2000). Kuitenkin HFC-245fa:lla vaahdotetut tuotteet mahdollistanevat noin 6–7 %:n ja HFC-365mfc:lla vaahdotetut noin 2 %:n energiansäästön syklo- tai syklo-isopentaanilla vaahdotettuihin tuotteisiin nähden (Williams et al. 2000). Kylmälaitteiden käyttämän energian tuotannossa aiheutuvat päästöt muodostavat selvästi suurimman osan laitteiden käyttöiän aikaisista päästöistä. Esimerkiksi HFC-245fa:n suorat päästöt ponneaineesta kompensoituvat syklopentaanin käytöstä aiheutuvan lisääntyneen energiankulutuksen päästöjen kanssa siten, että kokonaislämmitysvaikutusta tarkasteltaessa vaihtoehdoilla päästään lähes identtiseen tulokseen⁴⁴ (Williams et al. 2000). Koska uusilla nestemäisillä HFC-ponneaineilla vaahdotetut kovat polyuretaanieristeet ovat osoittautumassa tehokkaammiksi lämmöneristeiksi kuin esimerkiksi hiilivedyillä vaahdotetut tuotteet, ei HFC-yhdisteille vaihtoehtoisten ponneaineiden käyttöä esitetä tässä työssä absoluuttiseksi päästöjen vähentämismenetelmäksi.

⁴⁴ Kylmälaitteelle on oletettu 20 vuoden käyttöikä ja kaiken ponneaineen on arvioitu vapautuvan (Williams 2000)

Mikäli HFC-ponneaineiden käyttöä ei ole kannattavaa tai mahdollista korvata muilla vaihtoehtoilla, tulee huomio kiinnittää päästöjen hallintaan. Hyvän lämmöneristyksen tarjoavan ponneaineen diffuusio umpisoluisista polyuretaaneista on tyypillisesti hidas ja ponneaineen osuus alkuperäisestä määrästä sovelluksen käytöstäpoiston yhteydessä saattaa olla hyvinkin suuri. Esimerkiksi sandwich-elementtien käyttöikä on tavallisesti noin 50 vuotta ja ponneainetta on käyttöiän päättyessä jäljellä arviolta noin 65 % (Ashford 1999). Vastaavasti polyuretaanisovelluksia (esim. kylmälaitteissa) käytetään yleensä noin 15 vuotta, ja ponneaineen määrä käytöstäpoiston ajankohtana on arviolta yli 90 % (Ashford 1999). Tästä syystä eristeiden käytöstäpoiston yhteydessä tehtävällä HFC-yhdisteiden talteenotolla voidaan vaikuttaa merkittävästi päästöihin. HFC-yhdisteet voidaan oletettavasti CFC-yhdisteiden (Rossi & Hokkanen 1990) tavoin erottaa polyuretaanieristeestä jauhamalla eriste hienoksi sekä imemällä yhdisteet jauhetusta uretaanista alipaineen tai mekaanisen puristuksen avulla. Erotetut HFC-yhdisteet voidaan absorboida sopivaan materiaaliin tai tiivistää lauhduttimen avulla. HFC-sisältö voidaan myös hävittää polttamalla erotettu eriste asianmukaisessa polttolaitoksessa. Koska HFC-yhdisteitä sisältävien eristeiden käytöstäpoisto alkaa pääsääntöisesti vasta vuoden 2020 jälkeen, ei talteenottomenetelmille esitetä kustannusarvioita tässä työssä.

HFC-yhdisteille vaihtoehtoisten ponneaineiden käytöllä saavutettavaa absoluuttista päästövähennystä on hyvin vaikea määrittää. Siihen liittyy huomattavia epävarmuuksia muun muassa energian käytön muuttumisen, sovellettavuuden ja kustannusten suhteen. Tämän takia solumuoveille ei tässä työssä laadita päästövähennysskenaariota eikä lasketa päästövähennyskustannuksia.

4.3 Aerosolit

4.3.1 Yleistä

Aerosolien ponneaineet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 noin 61 kt CO₂-ekvivalenttia (kuvat 19 ja 20) HFC-päästöjä, jotka vastasivat noin 18 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,08 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000). Päästöt aiheutuivat teknisistä ja lääkinnällisistä aerosoleista sekä saumaeristeestä, jonka päästöt käsitellään tässä kohdassa, mutta varsinainen lähteen kuvaus on solumuovien yhteydessä kohdassa 4.2.

Aerosolisumutteet ovat tavallisesti kanistereihin tai purkkeihin ylipaineeseen pakattuja mikroskooppisten nestepisaroiden ja jonkin kaasun (yleensä muun kuin ilman) seosta. Aerosolituotteet voidaan lajitella usealla eri tavalla, mutta tässä selvityksessä erotellaan yleiset, tekniset ja lääkinnälliset aerosolit. Tällaisten aerosolien ponneaineena käytettiin

aikaisemmin runsaasti palamattomia CFC-yhdisteitä, koska ne ovat helppokäyttöisiä ja lisäksi ne toimivat joissakin sovelluksissa myös liuottimena tai eristeenä⁴⁵ (UNEP 1999b). Lääkinnällisissä aerosoleissa käytetyt CFC-yhdisteet olivat myös terveydelle vaarattomia. Suomessa CFC-yhdisteiden käyttö kasvoi aina vuoteen 1975 asti, jolloin tiedot niiden otsonia tuhoavista vaikutuksista saivat aikaan jyrkän laskun näiden yhdisteiden käytössä aerosolituotteissa⁴⁶ (Pipatti 1992). Useissa teollisuusmaissa yleisten kulutustuoteaerosolien ponneaineena ruvettiin käyttämään pääasiassa hiilivetyjä ja dimetyylieetteriä, joilla myös korvattiin osa teknisten aerosolien CFC-yhdisteiden käytöstä. 1990-luvulla kriittisimpien teknisten aerosolien CFC-yhdisteitä alettiin korvata myös HCFC-yhdisteillä pääasiassa sovelluksissa, joissa ponneaineen palamattomuus oli kriteerinä. Suomessa HCFC-yhdisteet korvattiin vuodesta 1995 alkaen pääasiassa HFC-yhdisteillä (Oinonen 2000). Lääkinnällisten aerosolien eli niin sanottujen inhalaatiosumutteiden (MDI = metered dose inhaler) CFC-yhdisteiden⁴⁷ kulutuksesta osa on pystytty korvaamaan vaihtoehtoisilla tekniikoilla ja 1990-luvun puolivälistä alkaen myös HFC-yhdisteillä. Maailmanlaajuisesti CFC-yhdisteiden käytöstäpoisto on vasta alussa (UNEP 1999a), ja niiden käyttö inhalaatiosumutteissa on myös Suomessa edelleen sallittua (Valtioneuvoston päätös 262/1998).

4.3.2 Inhalaatiosumutteet

MDI on pieni, käsikäyttöinen, paineistettu kestokulutuslääkeannostelija, joka mahdollistaa sopivan kokoisen lääkeannoksen imeytymisen keuhkoihin. Sitä käytetään astman ja kroonisten tukkeuttavien hengityselinsairauksien hoitoon. MDI-laitteissa käytettävien ponnekaasujen tulee olla mahdollisimman myrkyttömiä, syttymättömiä, stabiileja ja nesteytettyjä sekä maultaan, hajultaan ja lääkitämiseltä suorituskyvyltään hyväksyttäviä (March 1998). Lukuisten tutkimustulosten perusteella CFC-yhdisteiden korvaajina ainoastaan HFC-134a ja HFC-227ea täyttävät ponneaineelle asetettavat kriteerit (Wright 1999).

Suomessa on tällä hetkellä markkinoilla HFC-ponneaineella toimivia inhalaatiosumutteita 7–8 eri tuotenimellä. Ensimmäinen näistä tuli myyntiin vuonna 1995 ja kaksi seuraavaa vuonna 1998. Maailmanlaajuisesti inhalaatiosumutteina kulutettiin vuonna 1998 noin 10 kt CFC-yhdisteitä ja 1 kt HFC-yhdisteitä (UNEP, 1999b). MDI-laitteiden osuus hengityselinsairauksien hoitoon käytettävistä lääkeannostelijoista oli tällöin noin 77 % (Wright 1999).

⁴⁵ Eristeet on käsitelty kohdassa (4.2) ja liuottimet käsitellään kohdassa (4.4).

⁴⁶ Vuonna 1975 Suomessa käytettiin aerosoleihin arviolta 1 800 tonnia CFC-yhdisteitä (Pipatti 1992), kun vastaava luku vuonna 1990 oli noin 200 tonnia (Oinonen 2000)

⁴⁷ CFC-11, -12 ja -114 (UNEP 1999a)

HFC-ponneaineella toimivien MDI-laitteiden ja etenkin jauheannostelijoiden (DPI = dry powder inhaler) osuus markkinoilla on kuitenkin jatkuvasti kasvanut. On esitetty arvioita, joiden mukaan ainoastaan noin 25 % tällä hetkellä maailmanlaajuisesti hengityselinsairauksien hoitoon käytettävistä inhalaatiosumutteista olisi välttämättömiä (UNEP 1999b). Loput 75 % voidaan hoitaa pääasiassa jauheannostelijoilla sekä suullisesti annettavilla ja ruiskutettavilla lääkkeillä (UNEP 1999b). Korvaavien tuotteiden hyvän saatavuuden ansioista EU:ssa on asetettu tavoite CFC-käytön loppumiselle vuonna 2003 (COM 1998). HFC-ponneaineella varustettuja MDI-laitteita ei valmisteta Suomessa.

4.3.2.1 Perusskenaario

Inhalaatiosumutteiden ja jauheiden käyttömäärät ovat kasvaneet Suomessa erittäin nopeasti. Kun vuonna 1993 näitä tuotteita myytiin yhteensä noin 1,2 miljoonaa kappaletta, oli myynti vuonna 1998 jo noin 1,9 miljoonaa kappaletta. Vastaavalla myynnin kasvulla olisivat määrät vuosina 2010 ja 2020 noin 3,5 ja 4,8 miljoonaa kappaletta.

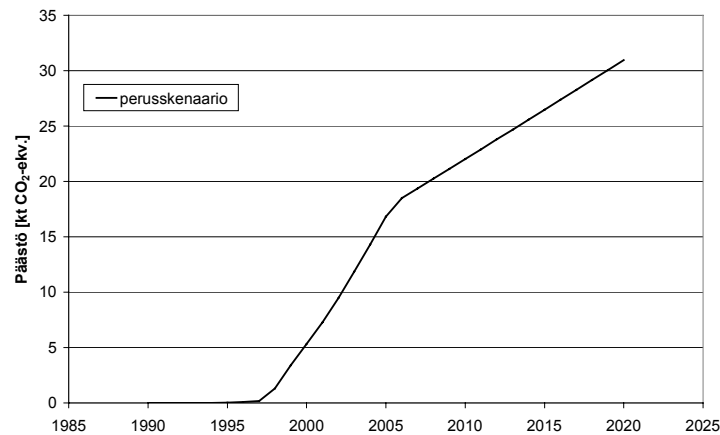
Valtaosa myytävistä tuotteista on kuitenkin jauheita, joiden osuus vuonna 1998 oli noin 64 %. Perusskenaariossa oletettiin, että jauheiden osuus vakiintuu 70 %:n tasolle vuoteen 2004 mennessä. Lisäksi CFC-ponneaineella toimivien MDI-laitteiden myynnin arvioitiin loppuvan vuonna 2005, jonka jälkeen kaikkien inhalaatiosumutteiden oletettiin toimivan HFC-ponneaineella.

Käytännössä katsoen 100 % MDI-laitteisiin kulutetusta ponneaineesta pääsee vapautumaan ilmaan (IPCC 2000). Päästö MDI-laitteista mallinnettiin siten, että vuoden t päästö muodostuu 50-prosenttisesti vuoden $t-1$ kulutuksesta ja 50-prosenttisesti vuoden t kulutuksesta. Kulutus määriteltiin myytyjen inhalaatiosumutteiden HFC-sisältönä. Yhden inhalaatiosumutepakkauksen oletettiin sisältävän noin 15 g HFC-ponneainetta, jonka keskimääräiseksi GWP₁₀₀-arvoksi oletettiin 1 440⁴⁸. Inhalaatiosumutteiden HFC-päästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 19.

Suomessa HFC-yhdisteiden käyttö on vähäistä johtuen inhalaatiojauheiden suuresta markkinaosuudesta. Lisäksi MDI-laitteiden sisältämä HFC-ponneainemäärä on niin alhainen, että päästöt pysyvät suurista laitteiden myyntimääristä ja voimakkaista

⁴⁸ Keskimääräisen GWP:n tarkoituksena on huomioida markkinoilla olevien kahden ponneaineen toisistaan poikkeavat GWP-arvot. Keskimääräinen GWP ja yhden pakkauksen ponneainesisältö laskettiin IPACin (International Pharmaceutical Aerosol Consortium) aineiston perusteella (ks. esim. UNEP 1999a).

kasvuennusteista huolimatta verrattain alhaisella tasolla sekä Kioton ensimmäisen velvoitekauden (22 kt CO₂-ekv.) että vuoden 2020 tasossa (31 kt CO₂-ekv.).



Kuva 19. Perusskenaario inhalaatiosumutteiden HFC-134a-päästöille.

4.3.2.2 Päästövähennysmenetelmät

Inhalaatiosumutteissa käytettäville HFC-ponneaineille ei tällä hetkellä tunneta ympäristön kannalta vähemmän haitallisia ponneainevaihtoehtoja (Wright 1999). Suomessa jauheannostelijoiden markkinaosuus on jo niin korkea, ettei sillä enää juurikaan voitane korvata inhalaatiosumutteiden käyttöä. Lääketeollisuus yrittää kuitenkin jatkuvasti kehittää teknologioita, joilla voitaisiin korvata ponneaineellisia lääkintämuotoja. Tutkimuskohteina on useita nestemäistä koostumusta käyttäviä tekniikoita (Wright 1999). Tällä hetkellä on kuitenkin mahdotonta ennustaa, missä määrin uudet tekniikat voivat MDI-laitteiden käyttöä korvata. Uusien tekniikoiden mahdollisesta käyttöönottoaikataulusta ja kustannuksista ei ole tietoa saavavilla. Näin ollen päästövähennysskenaariota inhalaatiosumutteiden HFC-päästöille ei voida tässä työssä esittää.

4.3.3 Tekniset aerosolit

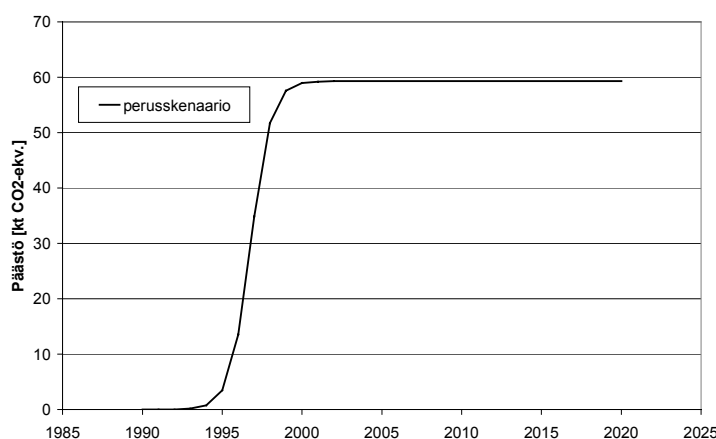
Teknisiä aerosoleja käytetään esimerkiksi pölyn ja irtolian poistoon ATK- ja konttorikoneista sekä muista elektronisista laitteista. Lisäksi niitä käytetään elektroniikan jäähdytykseen (vikojen toteaminen) sekä teollisuudessa ja merenkulussa käytettävänä hälytysääni- tai merkinantotorvina.

HFC-134a on korvannut CFC- ja HCFC-yhdisteet sellaisissa kohteissa, joissa ponneaineen tulee olla täysin syttymätöntä. HFC-152:ta voidaan käyttää kohteissa, joissa syttyvyyskriteerit eivät edellytä välttämättä HFC-134a:n käyttöä mutta ovat liian

tiukkoja esimerkiksi hiilivetyjen tai dimetyylieetterin käytölle⁴⁹. HFC-ponneaineet ja hiilivedyt toimivat useissa teknisten aerosolien käyttötarkoituksissa tehokkaasti, eikä niiden keskinäisissä suorituskyvyissä ole todettu kovin merkittäviä eroja (UNEP 1999a).

4.3.3.1 Perusskenaario

Suomessa valmistetaan teknisiä aerosoleja, ja niitä myös tuodaan maahan jonkin verran. Toiminnanharjoittajien vähäisen lukumäärän vuoksi tiedot valmistus- ja maahan-tuontimääristä ovat luottamuksellisia, minkä vuoksi perusskenaario on yhdistetty saumaeristeen käytöstä aiheutuvien päästöjen kanssa (kuva 20). Teknisten aerosolien päästöt mallinnettiin edellä MDI-laitteille kohdassa 4.3.2.1 kuvatulla tavalla.



Kuva 20. Perusskenaario HFC-134a- ja HFC-152a-päästöille teknisistä aerosoleista ja saumaeristeistä.

Teknisten aerosolien kulutuksen oletettiin vakiintuvan tietylle tasolle ja pysyvän sillä koko tarkastelujakson ajan. Tuleva kehitys on kuitenkin hyvinkin epävarmaa, ja siihen vaikuttanevat mm. haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) koskevan lainsäädännön kehitys sekä mahdollisten uusien käyttöalueiden ilmaantuminen (lähinnä käyttö-tarkoitukset, joissa vaaditaan palamatonta ponneainetta ja joissa ponneaineen hinta ei ole kriittinen tekijä) (Harnish & Gluckman 2000).

⁴⁹ HFC-152a:n palamislämpö on alhaisempi kuin dimetyylieetterin tai hiilivetyjen (UNEP 1999a).

4.3.3.2 Päästövähennysmenetelmät

Osa teknisten aerosolien HFC-ponneaineen kulutuksesta lienee korvattavissa vaihtoehtoisilla ponneaineilla, kuten hiilivedyillä, dimetyylieetterillä hiilidioksidilla, tyrellä tai paineistetulla ilmalla. HFC-yhdisteille vaihtoehtoisten ponneaineiden soveltuvuuskohteiden määrittely on kuitenkin hankalaa. Lisäksi on huomioitava, että HFC-yhdisteillä varustetut aerosolit maksavat yleensä enemmän kuin muut vaihtoehdot. Tällä perusteella voidaankin olettaa, että HFC-yhdisteiden kulutus vastaa myös tarkoitusta. Teknisten aerosolien HFC-ponneaineen päästöille ei esitetä päästövähennyskenaariota.

4.4 Liuottimet

Liuottimet eivät tietyvästi aiheuttaneet Suomessa vuonna 1999 lainkaan uusien kasvihuonekaasujen päästöjä (Ympäristöministeriö 2000). Ne saattavat kuitenkin tulevaisuudessa muodostaa hyvin vähäisen päästösektorin myös Suomessa.

CFC-113:a ja 1,1,1-trikloorietaania käytettiin aiemmin puhdistusliuottimina erilaisiin tarkoituksiin, kuten elektronisten komponenttien puhdistukseen ja metalliosien rasvanpoistoon. Vuonna 1989 liuottimina käytettiin maailmanlaajuisesti noin 136 080 t CFC-113:a ja vastaavasti noin 706 700 t 1,1,1-trikloorietaania (UNEP 1999a). Arviolta 90 % tästä määrästä on korvattu vaihtoehtoisilla menetelmillä, joita ovat esimerkiksi vesi- ja puolivesipohjaiset liuotusaineet sekä puhdistusvaiheen tarpeettomuus. Loput 10 % on korvattu erilaisilla orgaanisilla liuottimilla, kuten hiilivedyillä, alkoholeilla, HCFC-, PFC-, HFC- ja HFE-yhdisteillä sekä bromatuilla liuottimilla (UNEP 1999a). Suomessa CFC-113:a käytettiin vuonna 1989 noin 254 tonnia (Oinonen 2000).

PFC-yhdisteet: C_5F_{12} , C_6F_{14} , C_7F_{16} , C_8F_{18} (ks. liite A) tulivat kaupalliseen liuotinkäyttöön 1980- ja 1990-lukujen vaihteessa. Ne ovat korvanneet CFC-113:n muun muassa painettujen piirilevyjen puhdistuksessa, mekaanisten osien tarkkuuspuhdistuksessa ja tietokoneiden kovalevyjen voiteluaineiden kuljettajina. Lisäksi PFC-yhdisteitä käytetään elektronisten ja tarkkuusosien kuivaamiseen vesipohjaisen puhdistuksen jälkeen (IPCC/TEAP 1999). C_6F_{14} -liuotinsovelluksia tuotetaan maailmanlaajuisesti tällä hetkellä noin 2 500 t/a ja muita PFC-liuottimia arviolta 500–1 000 t/a (UNEP 1999a).

HFC-43-10mee on ainoa kaupallisesti saatavilla oleva HFC-pitoinen liuotin. Se on tullut markkinoille 1990-luvun puolivälissä. HFC-43-10mee soveltuu usein samoihin kohteisiin kuin PFC-yhdisteet ja lisäksi sitä käytetään esimerkiksi veden hylkimisaineena lentokoneiden tuulilaseissa (UNEP 1999a). HFC-43-10mee:n ominaisuudet liuottimena

ovat paremmat kuin PFC-yhdisteillä, joten sen uskotaan korvaavan myös PFC-liuottimia. Tällä hetkellä HFC-43-10mee:n käyttö on maailmanlaajuisesti vähäistä (500–1 000 t/a) ja se korvaa arviolta alle 1 %:n vuoden 1989 CFC-113:n käytöstä (UNEP 1999a). Suomen Ympäristökeskus ei ole havainnut HFC-43-10mee:n tai PFC-yhdisteiden liuotinkäyttöä Suomessa (Oinonen 2000).

1990-luvun puolivälissä kehitettiin liuottimiksi myös niin sanottuja HFE- (hydrofluoroether) yhdisteitä, joista HFE-7100 ja HFE-7200 ovat saavuttaneet kaupallisen tason. Niitä ei ole ainakaan toistaiseksi sisällytetty Kioton pöytäkirjan kaasukoriin, eikä IPCC (IPCC 1996) ole julkaissut niiden GWP-arvoja⁵⁰. HFE-7100 ja HFE-7200 eivät tuhoa stratosfäärin otsonia. Lisäksi ne ovat vain vähän myrkyllisiä ja täysin palamattomia. Ne ovat onnistuneesti korvanneet CFC-, HCFC-, HFC- ja PFC-liuottimia joissakin tarkkuuspuhdistusprosesseissa ja teollisissa aerosoliliuotinkäytöksissä (UNEP 1999a).

Koska HFC-, PFC- ja HFE-liuottimien valmistuskustannukset ovat korkeita verrattuna CFC-113:een ja HCFC-141b:hen, on liuottimien käyttömäärien hallintaa parannettu merkittävästi (UNEP 1999a). HFC-, PFC- ja HFE-liuottimien markkinoiden ei odoteta kasvavan kovin suuriksi, mikä johtuu juuri niiden korkeasta hinnasta ja vaihtoehtoisten tekniikoiden käytöstä. Vaikka näitä liuottimia otettaisiin tulevaisuudessa käyttöön myös Suomessa, olisivat niiden aiheuttamat päästöt arviolta hyvin vähäisiä, joten päästöskenaariota ei esitetä tässä työssä.

4.5 Sammutuslaitteet

4.5.1 Yleistä

Sammutuslaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 yhdessä magnesiumin painevalun ja puolijohdeteollisuuden kanssa noin 25 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 21) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 7 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,03 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000). Toiminnanharjoittajien vähäisyydestä johtuen päästötiedot ovat luottamuksellisia eikä sammutuslaitteiden päästöjä esitetä eriteltyinä.

Sammutuslaitteet ovat paloa tukahduttavia järjestelmiä, jotka voidaan jakaa alkusammutuskalustoon (käsi- ja liikuteltaviin sammuttimiin sekä sammutuspeittoihin, pikapaloposteihin yms.) ja kiinteisiin sammutuslaitoksiin. Käsi- ja liikuteltavien

⁵⁰ WMO (WMO 1999) arvioi HFE-7100:n GWP₁₀₀-arvoksi 390 ja vastaavasti HFE-7200:n 55

sammuttimien sammutusaineena käytettiin perinteisesti haloni 1211:ta ja vastaavasti kiinteissä järjestelmissä haloni 1301:tä (UNEP 1999a). Suomeen asennetuissa sammutuslaitteissa oli vuonna 1986 arviolta 330 tonnia haloni 1211:ta ja 350 tonnia haloni 1301:tä (NMR 1989). Suomessa haloneita sisältävien käsiammuttimien käyttö kiellettiin 1.1.1997 (VNp 891/1992)⁵¹. Käytössä olevista kiinteistä sammutuslaitoksista halonit tuli poistaa 1.1.2000 mennessä (VNp 262/1998).

Halogenoitujen yhdisteiden (esim. HFC- ja PFC-yhdisteiden) käyttö sammutusaineena voi olla perusteltua sellaisissa kohteissa, joissa tila ja paino ovat rajoitteena tai palon sammutusnopeus on kriittinen tekijä. Myös joidenkin vaihtoehtoisten sammutusmenetelmien aiheuttama akuutti myrkyllisyys voi olla perusteena alhaisen myrkyllisyyden omaavien halogenoitujen sammutteiden käyttöön, mikäli myrkyttömät vaihtoehdot eivät ole toteutuskelpoisia.

Maailmanlaajuisesti käsiammuttimien haloni 1211:n käyttö on korvattu lähes täydellisesti muilla sammutteilla, kuten vedellä, vaahdolla, jauhekemikaaleilla ja hiilidioksidilla. Joissakin harvoissa kohteissa, kuten lentokoneiden matkustamotiloissa, on otettu käyttöön myös HFC-yhdisteitä (HFC-23, HFC-236fa, HFC-227ea) (IPCC/TEAP 1999), (EPA 2000). PFC-yhdisteet eivät ole tarpeellisia käsiammuttimissa (UNEP 1999a).

Kiinteiden sammuttimien haloni 1301:n käytöstä noin 50 % on korvattu vesihöyryllä, siirrettävillä sammutuslaitteilla, jauheilla, sprinklereillä ja palon aikaisessa vaiheessa havaitsevilla järjestelmillä (UNEP 1999a). Jalokaasuseossammutteet (argon, typpi, hiilidioksidi) puolestaan korvaavat noin 25 % yllä mainitusta määrästä. HFC-yhdisteillä (HFC-227ea, HFC-23, HFC-125, HFC-134a, HFC-236fa) on korvattu noin 20–22 % ja PFC-yhdisteillä (C₄F₁₀) alle 1 % aiemmasta haloni 1301:n käytöstä (IPCC/TEAP 1999), (EPA 2000). Lisäksi on olemassa tiettyjä kriittisiä kohteita, kuten siviili- ja sotilaslentokoneet, jotka käyttävät edelleen haloneita sammutusjärjestelmissään. Tämä ryhmä kattaa noin 3–4 % aiemmasta halonien sammutekäytöstä.

4.5.2 Perusskenaario

Suomessa on tällä hetkellä ainoastaan yksi yritys, joka asentaa HFC-yhdisteitä sisältäviä kiinteitä palontorjuntajärjestelmiä. Yrityksen toimittamat järjestelmät käyttävät sammutteena HFC-yhdisteistä ja hiilidioksidista koostuvaa sammutetta (82 % HFC-134a,

⁵¹ Poikkeuksellisesti halonien käyttö sallitaan ilma-aluksissa ja vedenalaisissa aluksissa, palolaitosten henkilöturvallisuuden takaamiseksi käyttämissä käsiammuttimissa, maan hallinnon johtamisen ja turvallisuuden kannalta välttämättömissä, miehitetyissä johto-, viesti- ja tietokonekeskuksissa sekä puolustusvoimien miehitetyissä viesti- ja johtokeskuksissa, taisteluajoneuvoissa ja -aluksissa (VNp 262/1998).

10 % HFC-125, 8 % CO₂) (Oinonen 2000), (Vakuutusyhtiöiden keskusliitto 2001). Tämän sammutteen käyttökohteita ovat muun muassa teollisuuden prosesseja ohjaavat tietokonekeskukset. PFC-yhdisteitä ei tietävästi käytetä Suomessa sammutteaineena.

Selvitykset ovat osoittaneet, että vain alle 2 % asennetusta sammutteainemäärästä käytetään vuosittain (Little 1999), (IPCC 2000). Kun huomioidaan vielä laitteiden vuodoista ja onnettomuuksista aiheutuva lisäkulutus, ovat vuosittaiset päästöt alle 5 % asennetusta kapasiteetista (IPCC 2000). Uusien halogenoitujen hiilivetyjen kallis hinta on aiheuttanut huomattavia parannuksia sammutteen talteenotto- ja kierrätyskäyttöihin. Laitteiden sisältämästä HFC-määrästä saadaan laitteiden käytöstäpoiston yhteydessä talteen yleensä noin 85 % (IPCC 2000). Kiinteiden automaattisten sammutusjärjestelmien tekninen käyttöikä on yleensä alle 10 vuotta, mikä johtuu elektronisten laitteiden nopeasta kehitymisestä ja muuttumisesta.

Perusskenaarion päästöt laskettiin laitetoimittajan luovuttaman aktiviteettidatan perusteella (vuosittain asennetun sammutteen määrä). Päästökertoimiksi valittiin 0,1 % asenukselle, 5 % käytölle ja 20 % käytöstäpoistolle. Sammutuslaitteiden HFC-päästöjen perusskenaario esitetään erittelemättömänä yhdessä magnesiumin painevalun ja puolijohdeteollisuuden päästöjen kanssa kohdan 4.8.2 kuvassa 21.

Halogenoitujen hiilivetyssammutteiden käyttökohteet ovat luonteeltaan kriittisiä, eikä korvaavien sammutteiden käyttöönotto ole välttämättä mahdollista. Joissakin tapauksissa HFC-yhdisteiden käyttö saattaa olla korvattavissa muilla kaasuilla (esimerkiksi typestä, argonista ja hiilidioksidista koostuvilla sammutteilla), mutta tällaisista sovelluskohteista ei ole tarkempaa tietoa. HFC-sammutteille ei esitetä päästövähennysskenaariota.

4.6 Puolijohdeteollisuus

4.6.1 Yleistä

Puolijohteiden valmistus aiheutti Suomessa vuonna 1999 yhdessä magnesiumin painevalun ja sammutuslaitteiden kanssa noin 25 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 21) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 7 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,03 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000). Toiminnanharjoittajien vähäisyydestä johtuen päästötiedot ovat luottamuksellisia eikä puolijohteiden valmistuksen päästöjä esitetä eriteltyinä.

Puolijohteita käytetään integroitujen virtapiirien tavoin sähköiseen hallintaan erilaisissa sovelluksissa, kuten tietokoneissa, autoissa, rakennuksissa ja teollisuusprosesseissa. Sähköisten laitteiden kokoa on jatkuvasti haluttu pienentää, samalla kun laitteiden ominaisuuksia ja monimutkaisuutta on haluttu lisätä. Kehitys on johtanut sellaisen valmistusprosessin käyttöönottamiseen, joka mahdollistaa 1 µm:n ja sitä pienempien kokoluokkien puolijohdekomponenttien valmistuksen (Beu & Brown 1999).

1980- ja 1990-lukujen vaihteessa pienten puolijohteiden valmistuksessa otettiin käyttöön fluorattuja yhdisteitä, koska nämä muodostavat plasmaympäristössä piiyhdisteitä tehokkaasti syövyttäviä fluoriradikaaleja. Yleisesti käytetyt prosessikaasut esitetään taulukossa 28.

Taulukko 28. Puolijohteiden valmistusprosesseissa yleisesti käytetyt kaasut ominaisuuksineen ja niiden tyypilliset käyttökohteet (Bartos & Burton 1999).

yhdiste	kemiallinen kaava	keskim. elinikä ilmakehässä	GWP ₁₀₀	yleisimmät käyttökohteet	
				CVD-puhd.	etsaus
perfluorimetaani	CF ₄	50 000	6 500	X	X
perfluorietaani	C ₂ F ₆	10 000	9 200	X	X
perfluoripropaani	C ₃ F ₈	2 600	7 000	X	X
perfluorisyklobutaani	c-C ₄ F ₈	3 200	8 700		X
trifluorimetaani (HFC-23)	CHF ₃	264	11 700		X
typpi trifluoridi	NF ₃	740	* ¹⁾	X	X
rikkiheksafluoridi	SF ₆	3 200	23 900		X

¹⁾ IPCC (1996) ei arvioinut NF₃:lle GWP-arvoja, eikä sitä ole ainakaan toistaiseksi sisällytetty Kioton kaasukoriin. WMO (1999) arvioi NF₃:n GWP₁₀₀-arvoksi 10 800.

Puolijohteiden valmistus on monimutkainen prosessi, jossa fluorattuja yhdisteitä käytetään useassa eri vaiheessa. Mikroelektroniikassa tarvitaan yksikidekalvojen lisäksi päällystettyjä eriste- ja monikidekalvoja, jotka valmistetaan kemiallisella höyrypäälllystysmenetelmällä (CVD = chemical vapour deposition) pölyltä ja hiukkasilta vapaassa tilassa sijaitsevassa CVD-kasvatuskammiossa (Bartos & Burton 1999). Menetelmässä päällystetään tavallisesti yksikiteistä piilevyä ohuilla eristävillä ja johtavilla kalvoilla. Kasvatetut kalvot sisältävät tavallisesti monikiteistä piitä, piinitridiä, piidioksidia ja metalleja, kuten alumiinia tai volframia. Kasvatetut piiyhdisteitä sisältävät kalvot poistetaan tietyin väliajoin CVD-kammion sisäpinnoilta käyttämällä hyväksi fluorattuja yhdisteitä (taulukko 28), joista osa reagoi plasmassa fluorivedyksi syövyttäen ylimääräisen materiaalin pinnoilta (Bartos & Burton 1999). Piikiekossa olevat sähköiset rakenteet yhdistetään toisiinsa ohuella johdinmateriaalilla, joka sijoitetaan eristekerroksen päälle tai eristeeseen syövytettäviin uriin. Alle 3 µm:n viivanleveyksillä ei käytännössä voida käyttää märkäsyövytystä, sillä märkäsyövytys on isotrooppinen prosessi, joka syövyttää kalvoa yhtä nopeasti sekä syvyys- että vaakasuunnassa (Orpana 2000). Tällöin kapeat viivat kaventuvat liikaa ja suunnittelutiheys rajoittuu (Orpana 2000). Pienten rakenteiden syövytys tehdäänkin kuivasyövytyksellä, jossa syövyttävät radikaalit (fluoriatomit) syntyvät pintaa

pommittavassa plasmassa syövytyskaasuista (taulukko 28). Erilaisilla kaasukombinaatioilla sekä paineen ja tehon säädöillä voidaan kontrolloida syövytysnopeuksia ja syövytettävän levyn isotrooppisuutta.

Puolijohhteita valmistetaan maailmanlaajuisesti noin 400:ssa eri yrityksessä ja noin 1 100:ssa tehtaassa, joiden koko vaihtelee hyvinkin pienistä tutkimusyksiköistä suuriin tuotantolaitoksiin (Bartos & Burton 1999). On huomattava, että läheskään kaikissa tehtaissa ei käytetä fluorattuja yhdisteitä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa 350 tehtaasta noin 150 tekee tuotteensa märkäsyövytyksellä (Bartos & Burton 1999). Suomessa on pienten tutkimusyksiköiden lisäksi kaksi yritystä, jotka käyttävät fluorattuja yhdisteitä plasmasyövytykseen.

Puolijohdeteollisuuden valmistusmäärät ovat 1990-luvun puolivälin jälkeen kasvaneet keskimäärin noin 15 %/a (EPA 2000). Fluorattujen yhdisteiden kulutus on tosin kasvanut tätäkin nopeammin, mikä johtuu yhä pienemmistä ja monimutkaisemmista rakenteista (Harnisch & Hendriks 2000).

4.6.2 Perusskenaario

Puolijohhteiden valmistusprosesseissa vapautuvien fluorattujen yhdisteiden päästöjä on vaikea mallintaa, koska valmistuksessa käytettävien prosessien tilat vaihtelevat muun muassa käytettävistä kaasuista, työstövaiheesta (etsauksesta, CVD-puhdistuksesta), piikiekoista ja koneesta riippuen. Käytössä saattaa olla puhtaiden yhdisteiden lisäksi hyvinkin paljon toisistaan vaihtelevia kaasukombinaatioita. Näin myös käytettävien kaasujen syövytyskyky ja siten reagointi prosessissa vaihtelee runsaasti. Lisäksi osa kaasuista saattaa muodostaa prosessien aikana sivutuotteena jotain toista PFC-yhdistettä, jolloin päästöt syntyvät reagoimatta jääneestä kaasumäärästä ja syntyneestä sivutuotteesta. Raportoitujen arvioiden mukaan esimerkiksi prosessiin (sekä etsaus että CVD-puhdistus) syötetystä HFC-23:sta noin 10 % muodostaa CF₄-kaasua ja vähäisempi määrä C₂F₆-kaasua (Bartos & Burton 1999). Vastaavasti käytettäessä C₂F₆-kaasua yleensä 10–30 % muodostaa CF₄-kaasua (Bartos & Burton 1999).

Tuotteiden valmistuksessa kulutetusta kokonaiskaasumäärästä arviolta 60–70 % kuluu CVD-kammion puhdistuksessa (Bartos & Burton 1999, Harnisch & Hendriks 2000). Lisäksi käytettävien piikiekkojen koko vaikuttaa siihen, kuinka paljon kaasua kuluu yhtä tuotettua piilevyä kohden. Tällä hetkellä olemassa olevissa laitoksissa käytettävien piikiekkojen halkaisija on 100–200 mm (EPA 2000, Okmetic 2001). Työstettäessä 200 mm:n kiekkoja kaasun kulutus kasvaa yksittäisessä prosessivaiheessa yleensä ainoastaan 10–20 % tehtyä tuotetta kohden verrattuna 100 mm:n kiekkoihin, jolloin yksikkökulutus tuotettua puolijohdelevyä kohden pienenee noin 40 % (Orpana 2000).

Saatujen luottamuksellisten tietojen (ei esitetä eriteltyinä) perusteella arvioitiin, kuinka paljon kaasua keskimäärin kulutetaan yhtä prosessoitua piikiekkoa kohden. Laskelmien perusteella kaasun keskimääräinen kulutus työstettyä 100 mm:n piikiekkoa kohden on noin 3,3 g ja vastaavasti 200 mm:n kiekolla noin 3,9 g. Tietojen perusteella käytetylle kaasulle arvioitiin myös keskimääräinen GWP₁₀₀-kerroin, jonka arvoksi saatiin noin 10 300.

Koska puolijohdeteollisuuden prosessit ovat riippuvaisia tietoteknisestä ja elektroniikkateollisuuden kehityksestä, prosessityökoneiden tyypillinen käyttöaika on 5–10 vuotta (Orpana 2000, Harnisch & Hendriks 2000). Lisäksi alalla vallitsevan trendin mukaan tuotannossa ollaan siirtymässä yhä suurempien piikiekkojen käyttöön (halkaisija jopa 300 mm) (EPA 2000, Orpana 2000). Koska prosessit ja sitä kautta koneet uudistuvat nopeasti, oletettiin, että Kioton ensimmäisen velvoitekauden alkuun (2008) mennessä kaikki tuotanto tapahtuu vuoden 2000 jälkeen asennetuilla laitteilla ja 200 mm:n piikiekkaja käyttämällä. Tuotannon muuttaminen 200 mm:n kiekkojen käyttöä varten oletetaan tapahtuvan lineaarisesti vuosina 2002–2008. Perusskenaarion laadinnassa käytettiin näiden tietojen lisäksi luottamuksellisia vuoden 1999 valmistusmäärätietoja (joita ei esitetä eriteltyinä) ja oletettiin alan trendin mukaisesti 15 %:n vuotuisen tuotannon kasvun jatkuvan vuoteen 2020 saakka. Päästökertoimien arvioinnin vaikeudesta johtuen käytettiin yksinkertaisinta arviointimenetelmää (IPCC 2000) eli oletettiin päästöjen vastaavan kulutusta. Etsauskaasujen kulutuksen oletettiin kuitenkin seuraavan tuotannonkehitystä (eikä kasvavan nopeammin), mikä osittain kompensoi yksinkertaisen arviointimenetelmän aiheuttamaa virhettä. Puolijohdeiden valmistuksen aiheuttamien päästöjen perusskenaario esitetään erittelemättömänä yhdessä magnesiumin painevalun ja sammutuslaitteiden päästöjen kanssa kohdassa 4.8.2 kuvassa 21.

4.6.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Euroopan puolijohdeteollisuuden aiheuttamat päästöt olivat vuonna 1995 arviolta 300 t_{PFC} /a. Tuotannon nykyisellä kasvuvauhdilla (15 %/a) päästöt ovat noin 2 400 t_{PFC} /a vuonna 2010, joka vastaa noin 14 %:a EU-maiden yhteenlasketuista uusien kasvi-huonekaasujen arvioiduista päästöistä (Harnisch & Hendriks 2000). WSO (The World Semiconductor Council) on allekirjoittanut vapaaehtoisen sopimuksen, jonka mukaan sen jäsenyritykset vähentävät globaaleja PFC-päästöjä 10 %:lla vuoden 1995 tasosta vuoteen 2010 mennessä. Tämä tarkoittaisi Euroopassa melkein 90 %:n päästövähennystä vuoteen 2010 mennessä (Harnisch & Hendriks 2000) ja merkittävien päästövähennystoimenpiteiden käyttöönottoa.

Puolijohdeteollisuuden monimuotoisuudesta johtuen yleisiä päästövähennysmenetelmiä, jotka olisivat sovellettavissa koko tuotantokapasiteettiin, on hankala esittää. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi prosessien ja työstökoneiden erilaisuus, tilarajoitteet ja käytettävä teknologia. Pienten rakenteiden valmistuksessa plasmaetsaukselle ei tällä hetkellä tunneta vaihtoehtoisia tekniikoita. Päästöjen vähennystutkimus onkin keskittynyt sellaisten kemikaalien löytämiseen, joiden reaktiivisuus prosesseissa olisi huomattavasti nykyistä korkeampi. Myös erilaisia kulutuksen ja päästöjen hallintamenetelmiä on kehitetty.

4.6.3.1 CVD-kammion puhdistusprosessi

Käytössä olevissa CVD-kammioissa voidaan mahdollisesti ottaa käyttöön joitain C_2F_6 -kaasulle vaihtoehtoisia yhdisteitä, joiden käyttöaste olisi korkeampi ja GWP alhaisempi. Esimerkiksi C_3F_8 :n käytöstä C_2F_6 :n sijaan on raportoitu jopa 75 %:n päästövähennyksiä (EPA 2000). Olemassa olevien laitteiden ja laitosten tilarajoitukset estävät kuitenkin usein muunlaisten päästövähennystoimien käyttöönottamisen.

Uusien kammioiden puhdistus on todennäköisesti mahdollista operoida NF_3 -kaasulle, joka toimii erittäin voimakkaasti syövyttävänä yhdisteenä. Toistaiseksi riittävän puhtaan NF_3 :n tuottaminen on ollut ongelmallista, minkä takia sen hinta on ollut korkea ja saatavuus alhainen (Orpana 2000). CVD-kammion puhdistusprosesseissa ollaan kuitenkin siirtymässä yhä enemmän NF_3 :n käyttöön. Tällä hetkellä kaupallisella asteella on kaksi erilaista NF_3 -puhdistustekniikkaa. Toisessa menetelmässä NF_3 syötetään suoraan CVD-kammioon, jolloin on saavutettu jopa yli 90 %:n päästövähennyksiä kaikissa prosessitiloissa C_2F_6 -tasoon verrattuna (EPA 2000). Menetelmän lisäkustannusarvioita ei ollut tiedossa. Vielä tehokkaampi on tekniikka, jossa NF_3 syötetään plasman ylävirtaan ennen CVD-kammiota. Tällöin syntyvillä radikaaleilla voidaan valikoiden poistaa kerrostumia kammion seinämiltä. Tekniikalla on mahdollista saavuttaa jopa 95–99 %:n päästövähennys ja 30–50 % nopeampi puhdistusaika C_2F_6 -tasoon nähden (EPA 2000), (Harnisch & Hendriks 2000). Tällaisen NF_3 -järjestelmän lisäinvestoinnit ovat arviolta 420 000 mk CVD-kammiota kohden, joka käyttäisi muuten 200 kg C_2F_6 -kaasua vuosittain (Harnisch & Hendriks 2000). Lisäksi prosessin poistokaasun sisältämien myrkyllisten yhdisteiden (NF_3 , F_2 , SiF_4 , HF) hävittäminen tai käsittely märkäpesurilla maksaa arviolta noin 200 000 mk vuodessa (Harnisch & Hendriks 2000).

4.6.3.2 Etsausprosessi

Varsinaisessa piikiekkojen syövytyksessä prosessikaasun merkitys tuotannon ulosannin nopeuteen ja tuotteiden laatuun on suuri. Kaasun vaihtaminen olemassa oleviin

etsauskoneisiin on siten hyvin hankalaa, hidasta ja kallista. Sen sijaan uusissa etsauslaitteissa on arvioitu kannattavaksi käyttää C_2F_6 -kaasun sijasta vaihtoehtoisia yhdisteitä, kuten C_3F_8 :aa, C_4F_8 :aa tai C_5F_{10} :tä, joista on raportoitu jopa 30–75 %:n päästövähennyksiä C_2F_6 -tasoon verrattuna (EPA 2000), (Harnisch & Hendriks 2000).

Sijoittamalla pieni plasmalähde etsaustyökoneen ja pakokaasuvirran pääpumpun väliin voidaan PFC-yhdisteet dissosioida virrasta ja saada reagoimaan apukaasujen (H_2 , O_2 , H_2O tai CH_4) avulla pienen molekyyli­massan omaaviksi sivutuotteiksi (esim. HF:ksi), jotka voidaan poistaa märkäpesurilla (EPA 2000). Plasman vähennystekniikalla on saavutettu jopa yli 97 %:n päästövähennyksiä (apukaasuna H_2O), eikä häiriöitä etsausprosessiin ole havaittu (EPA 2000). Eriteltyjä investointi- ja käyttökustannuksia ei kuitenkaan ollut saatavilla.

Katalyyttiset hajotusjärjestelmät mahdollistavat joissain tapauksissa jopa 98 %:n PFC-päästövähennyksen. Järjestelmät ovat kuitenkin soveltuvia vain tiettyihin kaasu­virtauksiin ja prosessivaatimuksiin (EPA 2000).

4.6.3.3 Päästöjen hallinta

Prosessikaasujen jälkipolttimia voidaan soveltaa sekä CVD-kammion puhdistuksessa että etsauksessa vapautuviin fluorattuihin yhdisteisiin ilman, että teknologia vaikuttaa millään tavalla varsinaiseen työstöprosessiin. Useilla kaupallisesti saatavilla olevilla jälkipolttimilla voidaan vähentää tehokkaasti tiettyjä fluorattuja yhdisteitä, mutta vain harvat pystyvät kokonaisuudessaan yli 90 %:n vähennykseen (EPA 2000). Järjestelmä, joka pystyy vähentämään C_2F_6 -päästöjä karkeasti 90 %, maksaa arviolta 420 000 mk (Harnisch & Hendriks 2000). Lisäksi vuotuiset käyttökustannukset ovat noin 380 000 mk, mikä kattaa energia- ja prosessin poistokaasun sisältämien myrkyllisten yhdisteiden hävittämiskustannukset (Harnisch & Hendriks 2000). Jälkipolttimen käytöstä aiheutuvat energiantuotannon päästöt ovat hyvin pieni osa saavutettavasta prosessikaasujen päästövähennyksestä (noin 1–3 %), mikäli järjestelmää ei käytetä tyhjäkäynnillä.

Fluorattujen yhdisteiden talteenottojärjestelmillä on mahdollisuus päästä suhteellisen huomattaviin päästövähennyksiin, jotka ovat yleensä reilusti yli 90 % CF_4 -, C_2F_6 -, C_3F_8 - ja SF_6 -kaasuille, mutta CHF_3 :n ja NF_3 :n talteenottotehokkuus alenee tavallisesti 50–60 %:iin (EPA 2000). NF_3 -tekniikkaa käytettäessä on talteenottojärjestelmän taloudellisuus tavallisesti kannattamatonta, koska yhdisteen tehokkuus prosesseissa on niin korkea, että prosessin poistokaasuvirran NF_3 -pitoisuus jää hyvin alhaiseksi (EPA 2000). Esikäsitellyt talteenotetut yhdisteet voidaan siten joko prosessoida uudelleen,

kierrättää⁵² tai hävittää. Talteenottojärjestelmän eriteltyjä investointi- ja käyttökustannuksia ei ollut saatavilla.

Lisäksi CVD-kammion puhdistusprosessien optimoinnilla voidaan vähentää kaasujen ylimääräistä käyttöä, jolloin saavutettavat päästövähennykset saattavat olla jopa 50 %. Optimointimenetelmät riippuvat kuitenkin täysin tapauksesta, eikä niistä aiheutuvia lisäkustannusarvioita ollut saatavilla.

4.6.4 Päästövähennysskenaario ja -kustannukset

Puolijohdeteollisuuden päästöjen merkitys Suomessa on tällä hetkellä hyvin marginaalinen, mutta perusskenaariossa arvioidulla tuotannon kasvuvauhdilla (15 %/a) päästöt ja niiden merkitys kuitenkin kasvavat selvästi. Esitettyjen päästövähennykeinojen soveltaminen yksittäisiin yrityksiin sekä niiden prosesseihin ja tilanteisiin on kuitenkin hankalaa ja epävarmaa. Toiminnanharjoittajien vähäisyydestä ja tietojen luottamuksellisuudesta johtuen vähennyskeinoilla mahdollisesti saavutettavia päästövähennyksiä ja niistä aiheutuvia kustannuksia ei esitetä.

Puolijohdeteollisuutta koskien tässä työssä tyydyttiin arvioimaan esitettyjen päästövähennystoimien yksikköpäästövähennyskustannukset toimista, joiden lisäkustannukset olivat riittävän hyvin tiedossa. Päästövähennystoimiksi valittiin CVD-kammion puhdistuksessa NF₃-tekniikka (kaukosityttö) ja etsauksessa jälkipolttimien käyttö. Työstökoneiden ja vähennysmenetelmien käyttöiäksi oletettiin 8 vuotta. Näin lasketut päästövähennyskustannukset ovat CVD-kammion NF₃-tekniikalle 144 mk/t CO₂-ekv. ja etsauksen jälkipolttimille 267 mk/t CO₂-ekv. Arvot ovat vain suuntaa antavia, eikä niiden perustella voi arvioida saavutettavissa olevaa päästövähennystä esimerkiksi Kioton ensimmäisen velvoitekauden tai vuoden 2020 tasossa.

4.7 Muut PFC-päästölähteet

PFC-yhdisteitä käytetään Suomessa puolijohdekomponenttien valmistuksen lisäksi myös muihin tarkoituksiin. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi kylmäaineseos R-413A ja tiettyjen fluorattujen suksivahojen valmistus. Puolijohteiden valmistukseen verrattuna on PFC-yhdisteiden kulutus tällä hetkellä näissä käyttötarkoituksissa huomattavasti suurempi.

⁵² Kierrätettyjen PFC-yhdisteiden kysyntä on niin alhainen, ettei sitä voida tällä hetkellä harkita vaihtoehtona.

CFC-12-kylmäaineella toimivia kylmlaitoksia huolletaan joissakin tapauksissa R-413A-kylmäaineella, jonka yksi komponentti (ks. liite B, taulukko B-1.) on PFC-218-yhdisteenä tunnettu perfluoripropaani (C₃F₈). Tätä yhdistettä käytettiin Suomessa vuonna 1999 kylmlaitosten huoltoon noin 3,6 t (Ympäristöministeriö 2000). R-218:n käytön ennakoidaan vähenevän ja loppuvan CFC-laitosten käytöstäpoistumisen myötä, joten päästöskenaariion laadintaa ei tässä työssä nähty tarpeelliseksi.

Fluoratut suksivoiteet tulivat markkinoille tiettävästi vuonna 1985 (Vauhtispeed Oy 2001). Valmistuksessa käytetään kiinteiden fluoriyhdisteiden lisäksi myös nestemäistä perfluoriheksaania (C₆F₁₄), jota vuonna 1999 kulutettiin noin 0,3 t (Ympäristöministeriö 2000). Fluorattujen suksivoiteiden valmistusprosessista ei kuitenkaan saatu tarkempia tietoja, mutta oletettavasti prosessissa ainoastaan pieni osuus käytettävästä PFC-yhdistemäärästä haihtuu ilmakehään. Päästöskenaariota ei tässä työssä laadittu.

4.8 Magnesiumin painevalu

4.8.1 Yleistä

Magnesiumin painevalu aiheutti Suomessa vuonna 1999 yhdessä puolijohteiden valmistuksen ja sammutuslaitteiden kanssa noin 25 kt CO₂-ekvivalenttia (kuva 21) uusien kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka vastasivat noin 7 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,03 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasvihuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000). Toiminnanharjoittajien vähäisyydestä johtuen aktiviteettitiedot ovat luottamuksellisia, eikä magnesiumin painevalun päästöjä esitetä eriteltyinä.

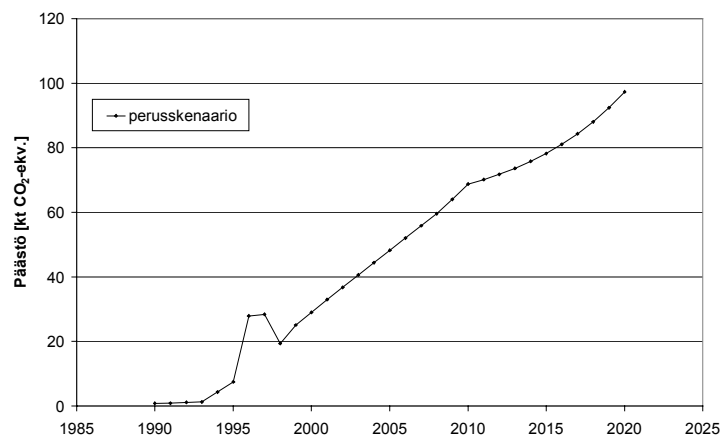
Sula magnesium ja sen seokset ovat haihtuvia yhdisteitä, jotka hapettuvat hyvin helposti ilmassa. Hapettumisen estämiseksi magnesiumin valuprosesseissa tarvitaan suoja-kaasua. Suojakaasuna voidaan käyttää rikkidioksidia (SO₂), booritrifluoridia (BF₃) tai rikkiheksafluoridia (SF₆) (Palmer 1999). SO₂ ja BF₃ ovat kuitenkin myrkyllisiä sekä voimakkaasti syövyttäviä esiintyessään korkeissa pitoisuuksissa, joten SF₆:n käyttö mahdollistaa helpommin puhtaamman ja myrkyttömän työtilan toteuttamisen. Lisäksi SF₆:n käytöllä saavutetaan laadukkaampia valutuotteita, mikä johtuu alhaisemmasta epäpuhtausmäärästä kuin muilla suojakaasuvaihtoehdoilla (Palmer 1999).

Rikkiheksafluoridia lisätään pieni määrä (pitoisuus alle 1 tilavuusprosentti) ilmaan tai ilman ja hiilidioksidin muodostamaan seoskaasuun, joka johdetaan valu-uunin höyrytilaan sulan magnesiumin päälle suojakaasuksi. Hyvin pieni osuus SF₆-määrästä reagoi magnesiumin kanssa muodostaen ohuen suojakalvon haihtuvan metallin pinnalle (Palmer 1999).

Magnesiumteollisuuden prosessit voidaan jakaa primääri- ja sekundäärituotantoon sekä paine- ja hiekkavaluun. Tarvittavat SF₆-kaasumäärät vaihtelevat huomattavasti erityyppisten prosessien välillä. Maailmanlaajuisesti painevalu on toiseksi yleisin magnesiumin loppukäyttökohde. Euroopassa on arviolta noin 100 aktiivista magnesiumin painevalimoa (Harnisch & Hendriks 2000). Painevalussa magnesiumosat valmistetaan valuttamalla sulaa magnesiumia muottiin, joka puristetaan tiukasti yhteen hydraulisen voiman välityksellä (Palmer 1999). Menetelmä on erittäin soveltuva pitkien, toleransseiltaan pienten ja kevyiden komponenttien valmistukseen. Suomalaisessa teollisuudessa esiintyy tiettävästi ainoastaan magnesiumin painevaluprosessi (yksi yritys), jonka sovelluksia ovat muun muassa matkapuhelimien kevyet ja jäykät komponentit. Painevalussa rikkiheksafluoridin pitoisuuden ilman tai ilman ja hiilidioksidin kanssa muodostamassa seoskaasussa suositellaan olevan 0,2–0,3 tilavuusprosenttia. Tällöin SF₆-kulutus tuotettua magnesiumtuotetta kohden on todennäköisesti noin 1 kg (Palmer 1999).

4.8.2 Perusskenaario

Magnesiumin painevalun perusskenaario perustuu tuottajan ilmoittamaan vuotuisen kaasukulutukseen vuosille 1994–1998 ja tuottajan omaan ennusteeseen kaasun kulutuksesta vuonna 2010. Vuosina 2010–2020 kulutuksen oletettiin pysyttelevän vuoden 2010 tasolla. Kulutuksen on oletettu vastaavan päästöjä 100-prosenttisesti, koska ainoastaan hyvin pieni osa kaasusta reagoi prosessissa, josta kaasu pääsee vapautumaan ilmakehään. Rikkiheksafluoridipäästöt magnesiumin painevalusta sisältyvät kuvan 21 päästöihin.



Kuva 21. Perusskenaario sammutuslaitteista, puolijohteiden valmistuksesta ja magnesiumin painevalusta aiheutuville HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöille.

4.8.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

Magnesiumin painevaluprosessien SF₆-kaasun käyttö on todennäköisesti korvattavissa SO₂:lla tai BF₃:lla (lähes) kaikissa prosesseissa. Muutokset edellyttävät kuitenkin mahdollisesti kaasun syöttöjärjestelmän uusimista sekä parannettuja tuuletus- ja hälytyslaitteita. Muutosten on arvioitu aiheutuvan keskimäärin noin 600 000 mk:n lisäinvestoinnit valimoa kohden (Harnisch & Hendriks 2000). Käyttö- ja huoltokustannusten voidaan karkeasti olettaa pysyvän yhtäläisinä. Kustannustietojen soveltaminen yksittäisiin yrityksiin vaatisi kuitenkin lisäselvityksiä ja tarkennuksia.

Mikäli SF₆-kaasun käyttöä ei ole mahdollista korvata vaihtoehtoisilla kaasuilla uusissa asennettavissa tuotantosoluissa, voidaan SF₆:n kulutusta ja päästöjä alentaa panostamalla tuotantoprosessien hallintaan. Uudet täysin automatisoidut painevalusolut ovat perinteisiä tiiviimpiä ja lisäksi käytetty suojakaasumäärä voidaan optimoida tarkasti prosessivaatimusten mukaan. Tällaisella uuniteknikalla voidaan SF₆-kaasun käyttöä vähentää selvästi perinteisiin uuneihin verrattuna. Esimerkiksi Saksassa neljän uuden painevalimon kaasun kulutus oli noin 25–30 g_{SF6}/t_{Mg} perinteisen 2–3 kg_{SF6}/t_{Mg}:n sijasta (Öko-Recherche 1999). Uudella tekniikalla saavutettavat päästövähennykset riippuvat kuitenkin päästöjen referenssitasosta, joiden tarkempia tietoja ei kustannusarvioiden tavoin ollut käytettävissä.

Yksittäisiin yrityksiin kohdistuvien tietojen sovellettavuusongelmista ja tiedon puutteesta johtuen magnesiumin painevalulle ei tässä työssä esitetä päästövähennys-skenaariota tai -kustannuksia.

4.9 Sähkölaitteet

4.9.1 Yleistä

Sähkölaitteet aiheuttivat Suomessa vuonna 1999 rikkiheksafluoridipäästöjä arviolta noin 0,8 tonnia (~19 kt CO₂-ekv.) (kuvat 22 ja 23). Määrä vastasi noin 6 %:a Suomen yhteenlaskettujen uusien (kuva 25) ja noin 0,02 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjaan sisällytettyjen kasviuonekaasujen päästöistä (Ympäristöministeriö 2000).

Rikkiheksafluoridin (SF₆) tuotanto aloitettiin tiettävästi vuonna 1953 Yhdysvalloissa, jolloin se myös otettiin sähkölaitteiden valmistajien toimesta käyttöön eristekaasuna (Maiss & Brenninkmeijer 1998). Vuonna 1995 sähkölaitteiden osuus SF₆:n globaalista kokonaiskäytöstä (8 200 t) oli noin 60 % (Maiss & Brenninkmeijer 1998). Vastaavana vuonna Suomessa havaittu SF₆:n kokonaiskulutus oli puoli promillea (4 t) globaalista

kulutuksesta ja aiheutuen lähes 100-prosenttisesti sähkölaitteista (Ympäristöministeriö 1997).

Sähköenergian siirto- ja jakeluverkon sähköasemilla suoritetaan tarpeellisia kytkentöjä, jännitteen muuntamista, sähköenergian siirron keskittämistä tai jakoa eri johdoille. Sähköasemia kutsutaan yleisesti myös nimellä *kytkinasema* tai *-laitos*. Katkaisijat kuuluvat kytkinlaitosten oleellisimpiin laitteisiin. Niiden tehtävänä on kuormitetun virtapiirin tai -johdon avaaminen ja sulkeminen. Sähkölaitteissa SF₆-kaasua käytetään eristeenä koteloiduissa kaasueristeisissä kytkinlaitoksissa (GIS = gas insulated switchgear) ja suurjänniteisissä voimansiirtojohtojohdoissa (GIL = gas insulated line) sekä muuntajissa, katkaisijoissa ja kuormanerotimissa. Tässä työssä kaikkia kaasueristeisiä sähköasemia kutsutaan yleisesti GIS-laitoksiksi ja SF₆-eristeiset kuormanerotimet luetaan kuuluviksi katkaisijoihin⁵³. SF₆-eristeisiä suurjännitevoimajohtoja on maailmanlaajuisesti asennettu vasta vähän eikä niitä ole Suomessa. Suurin osa sähkölaitteisiin käytetystä SF₆-kaasusta kuluu GIS-laitoksissa.

4.9.1.1 Kytkinlaitokset

Jännitteellisten osien eristäminen on välttämätöntä, jotta energiansiirto voidaan ylipäättään toteuttaa sähköisesti. Eristysrakenteen kykyä kestää jänniterasituksia ilman haittaa tai vahinkoa tuottavia sähköpurkauksia kutsutaan jännite- tai sähkölujuudeksi. Mitä parempi jännitelujuus eristeellä on, sitä vähemmän välimatkaa jännitteellisten osien (kuten johtimien) välille tarvitaan. Hyvän sähköisen eristyskyvyn lisäksi väliaineen tulisi olla muun muassa myrkytön, palamaton, korrodoimaton (Aro et al. 1996) ja ympäristön kannalta mahdollisimman haitaton. Liitteessä I esitetään vaihtoehtoisten kaasujen ominaisuuksia, jotka ovat oleellisia sähköisen eristämisen ja virrankatkaisun kannalta. Esitettyjen kriteerien perusteella vain ilma, typpi ja SF₆-kaasu tulevat kysymykseen kytkinlaitosten eristysväliaineena.

Perinteisesti suurjänniteverkkojen (123–420 kV) kytkinlaitokset rakennettiin avorakenteisina ulkokojeistoina (AIS = air insulated switchgear). Tällöin eristeenä toimii ilma. AIS-laitosten tilantarve osoittautui kaupungeissa ja taajamissa ongelmaksi jo vuosikymmeniä sitten. Ongelman ratkaisussa SF₆-kaasu on osoittautunut erinomaiseksi. Myös likaantumisen aiheuttamat haittavaikutukset teollisuusalueilla ja maisemalliset syyt edellyttävät toisinaan, että kytkinlaitokset on rakennettava suojatuiksi ympäristön haittavaikutuksilta ja mahdollisimman pienikokoisiksi (Aro et al. 1996). SF₆-eristeiset kytkinlaitokset tulivat laajempaan kaupalliseen käyttöön 1970-

⁵³ Kuormanerotin toimii erottimen tavanomaisten tehtävien lisäksi melko suurten kuormitusvirtojen katkaisemiseen

luvulla, jolloin niiden valmistus aloitettiin läntisessä Euroopassa ja Japanissa. Suomessa ensimmäinen GIS-laitos asennettiin tietävästi vuonna 1977 Helsinkiin (Harjanne & Hyvönen 1993).

GIS-laitosten jännitteelliset osat ovat jännitteestä riippumatta ilmatiiviisti suljetussa maadoitetussa metallikotelossa. Suurjännitekojeistojen kaasutilojen ylipaine on yleensä 4–7 bar ulkoilmaan nähden (Elovaara & Laiho 1999). SF₆:n jännitelujuus on noin 2,5 kertaa parempi kuin ilmalla, joten GIS-laitokset voidaan rakentaa selvästi pienempään tilaan ja tilavuuteen kuin vastaavan jännitetason AIS-laitokset. Lisäksi kotelorakenne mahdollistaa GIS-laitosten rakentamisen myös hyvin likaiseen ympäristöön. GIS-laitosten huoltotarve on vähäisempi kuin AIS-laitosten. Kaasutilojen avaamisen edellyttävä täyshuolto tehdään ainoastaan perustellusta syystä, esimerkiksi korjaustoimenpiteenä tai vakavaa vikaa epäiltäessä (Elovaara 2000). Suomen olosuhteissa GIS-laitos on rakennettava lämmitettyyn tilaan, sillä muuten jouduttaisiin muun muassa jännitelujuus-, huolto- ja korjauskysymysten kanssa vaikeuksiin (Elovaara & Laiho 1999).

Keskijänniteverkoissa (tavallisesti 20–110 kV) kytkinlaitosten kehitys on kulkenut täysin avorakenteisista kohti suljetumpia kojeistoja. Ulkokojeistojen rinnalla on otettu käyttöön avorakenteisia sisäkojeistoja, mutta myös SF₆-eristys on yleistynyt viime vuosina. Keskijänniteverkkojen GIS-laitokset ovat joko katkaisijakytkinlaitoksia tai muuntamokojeistoja. Tällaisten GIS-laitosten kaasutilojen ylipaine ulkoilmaan nähden on yleensä 2,2–2,5 bar (Elovaara & Laiho 1999).

4.9.1.2 Katkaisijat

Virtapiirin katkaisulle on luonteenomaista, ettei virta katkea heti katkaisijan koskettimien avautuessa vaan virtapiiri pysyy suljettuna niin sanotun valokaaren välityksellä. Koskettimien avautuessa vastus kasvaa ja kosketinpinnat lämpenevät. Viimeiset kosketuspisteet sulavat ja koskettimien välille syntyy sula metallinen silta, joka höyrystyy. Metallihöyry ja sitä ympäröivä väliaine ionisoituvat, jolloin syntyy johtava kaasuplasma eli valokaari. Katkaisijan koskettimet siirretään suuren virran aikana niin kauaksi toisistaan, että syntynyt avausväli kestää täyden jännitteen valokaaren sammuttua. Virran nollakohdassa valokaaren vastus kasvaa hyvin nopeasti, kun sitä samalla sopivasti jäähdytetään jollakin väliaineella. Näin valokaari muuttuu johteesta eristeeksi (Elovaara & Laiho 1999). Katkaisijoissa käytettävän väliaineen valokaaren sammutuskyky onkin eristyskyvyn ohella erittäin oleellinen tekijä väliainetta valittaessa.

Suur- ja keskijännitealueella käytettiin katkaisijoiden kammioissa väliaineena perinteisesti öljyä. Suuret öljymäärät aiheuttivat kuitenkin syttyessään (vikojen seurauksena) tuhoisia räjähdyksiä, joten niiden tilalle kehitettiin niin sanotut vähäöljykatkaisijat. Markkinoille tuli myös paineilmalla toimivia katkaisijoita, jotka olivat pitkään vähäöljykatkaisijoiden rinnalla tärkeimpiä katkaisijatyyppejä. 1970- ja 1980-luvuilla tapahtui kuitenkin merkittävä murros katkaisijatekniikassa. Seurauksena oli SF₆- ja tyhjökatkaisijoiden voimakas yleistyminen (Elovaara & Laiho 1999).

Suurjännitealueella SF₆-katkaisijat ovat syrjäyttäneet lähes kaikki muut katkaisijatyypit. SF₆-katkaisijan etuja ovat kaasun palamattomuus, suuri valokaaren sammutuskyky, yhdellä katkaisuyksiköllä saavutettava suurempi palaavan jännitteen kestokyky ja siitä johtuva suurempi katkaisuteho kuin kilpailevilla tekniikoilla (Elovaara & Laiho 1999). SF₆-katkaisijan huoltotarve on vähäinen, sillä niiden mekaaninen käyttöikä on tavallisesti 5 000–10 000 toimintakertaa⁵⁴ (Elovaara & Laiho 1999) ja käyttöaika kymmeniä vuosia (Hirvonen 2000). Kylmässä ilmastossa ulkoasennuksissa SF₆-katkaisijoihin liittyvä ongelma on kaasun mahdollinen nesteytyminen. Tämä voidaan välttää korvaamalla osa SF₆-kaasusta tyypellä tai CF₄-llä, jolloin kaasun nesteytymislämpötilaa saadaan alennettua (CIGRE 2000).

Keskijännitealueella SF₆- ja tyhjökatkaisijat ovat syrjäyttäneet käytännössä kokonaan vähäöljykatkaisijat, joita ei enää esimerkiksi Suomessa valmisteta lainkaan. Kilpailu SF₆- ja tyhjökatkaisijoiden välillä on voimakasta. Tyhjökatkaisijat ovat jatkuvasti kasvattaneet markkinaosuuttaan siten, että uusissa asennettavissa katkaisijoissa tyhjötekniikka on hallitseva 36–38 kV:n käyttöjännitteelle saakka (IEE 1998).

4.9.2 Perusskenaario

Sähköalan kansainvälinen järjestö (CIGRE) on laatinut 1990-luvun alussa ohjeistusta SF₆-päästöjen pienentämiseksi. Ohjeistuksissa tuodaan esiin muun muassa SF₆-kaasun ympäristöhaitat (CIGRE 1996) sekä esitetään suositeltavia toimenpiteitä SF₆-kaasun ja sen hajoamistuotteiden käsittelyä (CIGRE 1991a ja b), kierrätystä ja hävittämistä varten (CIGRE 1997). Näiden ohjeistusten myötä SF₆-kaasun efektiiviset päästöt sähköjakelulaitteista ovat pienentyneet merkittävästi maailmanlaajuisesti.

Suomessa asennettiin vuonna 1999 vajaat 500 SF₆-eristeistä sähkölaitetta, joihin käytetty rikkiheksafluoridin määrä oli noin 1,4 t. Suomessa rikkiheksafluoridin kokonais-

⁵⁴ Toimintakertojen määrä ja katkaisuvirtojen suuruus vaikuttavat koskettimien kulumiseen sekä epäpuhtauksien ja hajoamistuotteiden sekoittumiseen eristyskaasuun. Nämä tekijät vaikuttavat katkaisijan huoltotarpeeseen.

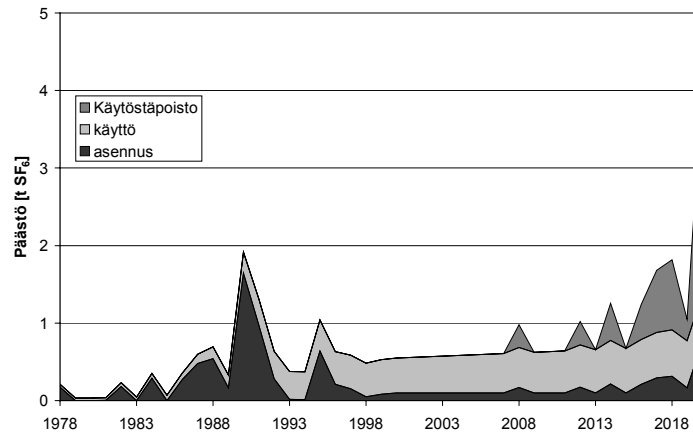
määrä sähkölaitteissa on tällä hetkellä noin 50 t. Määrä on kasvanut vuosittain keskimäärin 2,1 tonnia 1970-luvun lopulta lähtien. Taulukossa 29 esitetään sähkölaitteiden SF₆-päästöjen skenaarioiden laadinnassa käytetyt oleelliset parametrit.

Suurjännite- ja keskijännitealueeseen sekä edelleen GIS-laitoksiin ja katkaisijoihin kulutettava SF₆-kaasumäärä (taulukko 29) arvioitiin soveltamalla eri lähteiden tietoja (esimerkiksi Öko-Recherche 1999, Olivier & Bakker 1999, Harnisch & Hendriks 2000). Sähkölaitteissa vuosina 1977–1999 ollut SF₆-kaasun kokonaismäärä suhteutettiin vastaavan ajanjakson sähkön kokonaiskulutuksen kehitykseen⁵⁵. Tuleva SF₆-kaasun kokonaismäärä suhteutettiin vastaavalla tavalla käyttäen hyväksi sähkön kokonaiskulutuksen kehityssuunnitusta vuoteen 2015 (Finergy 2000) ja olettamalla kehityksen pysyvän vakiona vuoteen 2020 saakka. Käytöstä poistettavien laitojen sisältämä SF₆-kaasumäärä arvioitiin korvattavan vastaavalla määrällä. Laskelmien perusteella SF₆-kaasun määrän arvioitiin kasvavan noin 1,6 t/a (taulukko 29).

Vuonna 1996 SF₆-kaasun päästöihin ruvettiin kiinnittämään entistä enemmän huomiota, mikä johti muun muassa asennuksen yhteydessä tapahtuvien päästöjen pienemiseen ja tiiviimpien laitteiden kehittämiseen. Asennuksen päästökertoimet perustuvat IPCC:n (2000) asiantuntija-arvioihin ja uusien laitteiden tiiviyyteen (vuosina 1980 ja 1996) liittyvät oletukset Öko-Recherchen (1999) arvioihin. Kaikille laitteille on oletettu tehtävän yksi jokaisen kaasutilan avaamisen edellyttävä täyshuolto käyttöajan aikana. Huollon arvioitiin tapahtuvan laitteen 15–20 vuoden käytön jälkeen. Ensimmäisten huoltojen arvioitiin tapahtuvan vuonna 1993. Huollon päästöt riippuvat kaasulle suoritettavasta talteenotosta. SF₆-kaasun talteenottoon laitteet ovat suhteellisen uutta tekniikkaa, ja niitä ei tiettävästi ole tälläkään hetkellä käytössä kuin 5–6 kappaletta Suomessa (Salo 2000). Näillä laitteilla pystytään kuitenkin oletettavasti kattamaan suurin osa huolloista. Talteenoton on oletettu alkaneen vuonna 1996 (15 %) ja lisääntyneen lineaarisesti siten, että vuosittain huollettavista laitteista kaasun talteenotto suoritetaan 75 %:lle huollettavasta kokonaiskaasumäärästä vuonna 2000 (taulukko 29). Tämän jälkeen talteenotto käytännön on arvioitu pysyvän ennallaan. Vuosittain asennetun laitekannan huoltojen on arvioitu esiintyvän tasaisesti viiden vuoden ajalla 15–20 vuoden kuluttua laitekannan käyttöönnotosta.

⁵⁵ On esitetty, ettei SF₆-kaasun kokonaismäärän suhteuttaminen sähkönkulutuksen kasvuun ole oikea peruste ennusteen tekemiselle. Sähkönjakeluverkostojen suhteellista rakentamista hidastaa verkossa oleva yli- ja reservikapasiteetti. Myös mahdollinen hajautetun tuotannon yleistymisen vaikutus kehityssuunnusteeseen. Toisaalta on todennäköistä, että tilaa säästävien ja toimintavarmempien SF₆-kaasueristeisten ratkaisujen suhteellinen määrä tulee tulevaisuudessa yleistymään. Nämä seikat osittain kumoavat toistensa vaikutusta, joten tekijät katsovat konservatiivisen ennusteen olevan riittävän tarkoituksenmukainen.

Laitteiden käyttöikäksi on arvioitu 30 vuotta (IPCC 2000). Käytöstäpoiston päästöt riippuvat huollon päästöjen tavoin SF₆-kaasun talteenottokäytännön tasosta. Ensimmäisten laitteiden teknisen käyttöiän on arvioitu päättyvän vuonna 2008. Tällöin talteenoton on oletettu kattavan 75 % laitekannan sisältämästä kaasumäärästä (taulukko 29). Sähkölaitteiden SF₆-kaasupäästöjen perusskenaario esitetään kuvassa 22.



Kuva 22. Perusskenaario rikkiheksafluoridipäästöille sähkölaitteista. Laitteiden erielinkaarivaiheina on eroteltu asennus, käyttö ja käytöstäpoisto.

Perusskenaariossa (kuva 22) esiintyvät nopeat päästöjen nousut ja laskut johtuvat uusien laitteiden asentamismäärien eroista eri vuosina. Koska laitteiden käyttöikä on arvioitu vakioksi, on myös laitteiden käytöstäpoiston ajoittuminen sidoksissa käyttöönottovuoteen. Osittain tätä on tasoitettu käyttämällä vuosien 2000–2020 päästöjen arvioinnissa kolmen vuoden liukuvaa keskiarvoa.

4.9.3 Päästövähennysmenetelmät ja kustannusarviot

4.9.3.1 Vaihtoehtoiset tekniikat

SF₆-eristeisiä kytkinlaitoksia voitaisiin teoriassa yrittää korvata avokytkinlaitoksilla. Ne vaativat kuitenkin huomattavasti suuremman rakennusalan ja tilavuuden kuin GIS-laitokset. Esimerkiksi 123 kV:n AIS-laitos vie noin 75 % enemmän rakennusala ja noin 85 % enemmän rakennustilavuutta kuin vastaava GIS-laitos (Elovaara & Laiho 1999).

Lähes kaikki GIS-laitokset sijaitsevat taajamissa, suurkaupungeissa tai paikoissa, joissa tila on muuten rajoitettu. Tällaisilla alueilla AIS-laitokset olisi joko sijoitettava kallion sisään tai vietävä niin kauas kulutuksesta, että soveltuvaa maa-alaa olisi käytettävissä. Ensimmäinen vaihtoehto on kustannuksiltaan niin kallis, että sen toteuttaminen tuskin on realistista. Jälkimmäisen vaihtoehdon toteuttaminen on teknisesti mahdollista, mutta

sen kannattavuus kokonaispäästövähennämisen kannalta on todennäköisesti hyvin huono tai jopa negatiivinen. Liitteessä J esitetään standardin ISO 14040 mukaisen elinkaari-analyysin tulosten vertailu tietyn saksalaisen kaupungin sähkönjakelun toteuttamisesta GIS-laitoksilla tai kulutuksesta kauemmaksi siirrettyjen AIS-laitosten avulla. Käyttämällä GIS-laitoksia sähköenergia voidaan tuoda kaupungin kulutuspiesteisiin korkeammalla jännitteellä kuin kauemmas kulutuksesta sijoitetuilla AIS-laitoksilla, jolloin siirtohäviöt jäävät vähäisemmiksi ja primäärienergian kulutus on pienempää (liite J). Lisäksi laitosten rakentamisen tarvitseman primäärienergian sekä materiaalin ja maa-alan tarve on tällöin vähäisempää kuin AIS-laitoksilla (liite J). Elinkaari-analyysin perusteella GIS-toteutuksen vaikutus ilmastonmuutokseen on noin 21 % pienempi kuin tarkastellun AIS-toteutuksen (liite J).

Suurjännitteisissä GIS-laitoksissa ja katkaisijoissa SF₆-kaasu on osoittautunut tekniseltä suorituskyvyltään ja monilta muilta ominaisuuksiltaan niin hyväksi, että sen korvaaminen muilla tekniikoilla ei ole kannattavaa tai mahdollista. Sen sijaan keskijännitealueella tyhjötekniikalla voidaan korvata SF₆-katkaisijoita mahdollisesti jopa 84 kV:iin saakka (IEE 1998). Nykyään on kaupallisesti saatavilla myös keskijännitealueen GIS-laitoksia, joissa on SF₆-eristys ja tyhjökatkaisijat. Arvioiden mukaan keskijännitealueen katkaisijoiden SF₆-kaasun käyttö muodostaa vain muutaman prosentin sähkölaitteissa käytettävästä kokonaismäärästä (taulukko SL1), joten tyhjötekniikalla ei voida kuitenkaan merkittävästi vähentää SF₆-kaasun käyttöä.

4.9.3.2 Täytöksen pienentäminen

Sähkölaitteiden SF₆-kaasulle on etsitty systemaattisesti yli 20 vuotta korvaavia yhdisteitä, mutta yhtään sellaista, jonka tarkoituksenmukaiset ominaisuudet olisivat yhtä hyvät kuin SF₆:lla, ei ole löydetty (Niemeyer 1998). Lisäksi on osoittautunut, että monissa tapauksissa SF₆-kaasun korvaaminen on johtanut laitteen tai järjestelmän aiheuttaman kokonaisympäristöhaitan kasvuun (Niemeyer 1998). Tästä syystä tämän hetken päästövähennyspyrkimykset liittyvät pääasiassa toiminnon (eristyksen tai valokaaren sammutuksen) suorittamiseen tarvittavan SF₆-kaasumäärän vähentämiseksi ja päästöjen pienentämiseksi (CIGRE 2000).

Sähköisen läpilyönnin eristämiseen käytettävää SF₆-kaasumäärää voidaan yrittää vähentää laimentamalla SF₆-kaasua ympäristöystävällisemmällä apukaasulla. Koska seoskaasujen sähkölujuus on osoittautunut aina alhaisemmaksi kuin puhtaan SF₆-kaasun, täytyy seoskaasun painetta nostaa, jotta puhdasta SF₆-kaasua vastaava sähkölujuus saavutettaisiin ilman kaasutilojen laajentamista. Jotta SF₆:n nettomäärää saataisiin vähennettyä, täytyy seoskaasun osoittaa synergiaa siten, että SF₆-määrän lisääntymisen vaikutus sähköiseen eristyskykyyn on suurempi kuin sen konsentraation

lisäys (CIGRE 2000). SF₆-kaasuun sekoitetut korkeat typpipitoisuudet (80–95 %) ovat osoittaneet voimakasta eristyssynergiaa (liite K). Esimerkiksi laimentamalla tyypellä SF₆-kaasun pitoisuus 10 %:iin SF₆:n nettokulutus vähenee 85 % siitä huolimatta, että seoskaasun paine on nostettu tasolle, joka tuottaa ekvivalentin eristyskyvyn puhtaaseen SF₆-kaasuun verrattuna (CIGRE 2000). Liitteessä K vertaillaan SF₆-N₂-seoskaasun sähköistä eristyskykyä laimentamattomaan SF₆-kaasuun normalisoituna ja paineen funktiona.

Toistaiseksi tyyppiä on käytetty CF₄:n⁵⁶ tavoin seoskaasuna kylmiin olosuhteisiin asennettavien katkaisijoiden SF₆-kaasun nesteytymisen estämiseksi. Toiminto perustuu SF₆-kaasun osapaineen pienentämiseen, ja sekoitetut apukaasumäärät ovat tavallisesti 5–10 %. Typen lisäys huonontaa kuitenkin kaasun valokaaren sammutuskykyä siinä määrin, ettei merkittäviä typpipitoisuuksia sisältävää seoskaasua voida käyttää tehokkaasti katkaisijoissa, jotka on suunniteltu puhtaalle SF₆-kaasulle (vrt. liite K). Näin ollen seoskaasujen käytöllä ei voida vähentää SF₆:n nettomäärää katkaisutapahtumia vaativissa tiloissa. Sen sijaan kaasueristettyjen kytkinlaitosten (GIS)⁵⁷ katkaisukammiota ympäröivät hermeettiset tilat on teoriassa mahdollista eristää seoskaasulla (CIGRE 2000, Diessner et al. 1999). Alkuperäisen tilavuuden ja sähköisen lujuuden säilyttämiseksi tehtävä paineenkorotus saattaa kuitenkin aiheuttaa käytännössä ongelmia, jotka tulee selvittää ennen kuin seoskaasujärjestelmien käyttöönottoa voidaan harkita (CIGRE 2000). Lisäksi on tehtävä kokonaisvaltainen ISO 14040 -standardin mukainen elinkaarianalyysi, jolla seoskaasujärjestelmän mahdollisesti myönteinen ympäristövaikutus saadaan varmistettua (CIGRE 2000). Suomen ilmastollisissa olosuhteissa seoskaasujärjestelmä vähentäisi kuitenkin SF₆-kaasun nesteytymisriskiä, jolloin GIS-laitoksia voitaisiin mahdollisesti asentaa myös lämmittämättömään tilaan. Tämä kompensoisi yhdessä SF₆-kaasun säästämisen kanssa vahvempien rakenteiden aiheuttamia lisäkustannuksia. Eriteltyjä kustannusarvioita tai mahdollista käyttöönotto-aikataulua ei kuitenkaan ole saatavissa.

4.9.3.3 Päästöjen hallinta

Sähkölaitteisiin liittyvä oleellisin SF₆-päästöjen vähennyskeino on talteenottokäytännön lisääminen ja parantaminen. Arvioiden mukaan Suomessa on tällä hetkellä käytössä 5–6 kappaletta sähkönjakelulaitteiden kunnossapitoon käytettävää SF₆-kaasun talteenottojärjestelmää (Salo 2000). Lisäämällä tämä määrä noin kaksinkertaiseksi ja

⁵⁶ PFC-yhdisteenä ja voimakkaana kasvihuonekaasuna (ks. liite A) tunnetun CF₄:n ja rikkiheksafluoridin muodostamalla seoskaasulla ei ole kuitenkaan todettu olevan ympäristön kannalta myönteistä vaikutusta laimentamattomaan SF₆-kaasuun nähden (CIGRE 2000).

⁵⁷ Seoskaasujärjestelmän on arvioitu olevan kaikkein potentiaalisin ratkaisu kaasueristettyihin voimansiirtojohtoihin (GIL), joita ei kuitenkaan ole asennettu Suomeen.

organisoimalla laitteiden käyttö tehokkaaksi voitaisiin järjestelmillä arviolta kattaa käytännössä koko Suomen sähkölaitteiden tarvitsema kaasun talteenotto huollon ja käytöstäpoiston aikana⁵⁸. Arvioiden mukaan talteenottojärjestelmä koulutuksineen maksaisi noin 200 000 mk (Harnisch & Hendriks 2000). Vuosittaiset käyttökustannukset ovat arviolta 60 000 mk, ja ne koostuvat pääasiassa työvoimakustannuksista, joista on vähennetty talteensaattavan SF₆-kaasun arvo (Harnisch & Hendriks 2000).

4.9.4 Päästövähennysskenaario ja -kustannukset

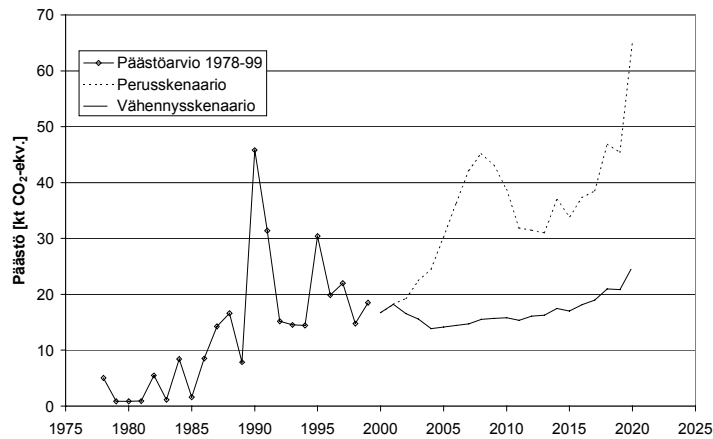
Päästövähennystoimeksi valitaan SF₆-kaasun talteenotto- ja kierrätysmenetelmien parantaminen asianmukaisia kaasun käsittelylaitteita lisäämällä ja tehokkaasti käyttämällä. Kunnossapitoon käytettävien käsittelylaitteiden lisätarpeen arvioidaan olevan viisi kappaletta, ja ne oletetaan otettavan käyttöön vuoden 2002 alusta alkaen. Käsittelylaitteiden käyttöiäksi arvioidaan 15 vuotta, jolloin vuonna 2016 joudutaan investoimaan uusiin laitteisiin. Kaasun talteenotossa tapahtuville häviöille arvioidut päästökertoimet esitetään taulukossa 29 ja päästövähennysskenaario kuvassa 23.

Taulukko 29. Sähkölaitteiden skenaarioiden keskeisimmät parametrit.

lähtöarvot ja oletukset	perusskenaario	vähennysskenaario
uusiin laitteisiin asennettu SF ₆ -kaasumäärä ennen vuotta 2000	2,1 t/a	
uusiin laitteisiin asennettu SF ₆ -kaasumäärä 2000–2020	1,6 t/a	1,6 t/a
VHV- ja EHV-laitteiden ⁵⁹ (123–420 kV) osuus SF ₆ -kaasun käytöstä:	85 %	85 %
- GIS-laitokset	(85 %)	(85 %)
- SF ₆ -katkaisijat	(15 %)	(15 %)
keskijännitelaitteiden osuus SF ₆ -kaasun käytöstä:	15 %	15 %
- GIS-laitokset	(85 %)	(85 %)
- SF ₆ -katkaisijat	(15 %)	(15 %)
päästökertoimet:		
- asennus (ennen vuotta 1980 asennetut)	15 %	
- asennus (vuosina 1980–1995 asennetut)	15 %	
- asennus (vuoden 1996 jälkeen asennetut)	6 %	6 %
- käytön aikainen vuoto (ennen vuotta 1980 asennetut)	3 %	3 %
- käytön aikainen vuoto (vuosina 1980–1995 asennetut)	1 %	1 %
- käytön aikainen vuoto (vuoden 1996 jälkeen asennetut)	0,5 %	0,5 %
- käytön aikainen huolto (<- 1995)	100 %	
- käytön aikainen huolto (1996–2000)	25–100 %	
- käytön aikainen huolto (2001–2002)	25 %	
- käytön aikainen huolto (2002–2020)	25 %	0,4 %
- käytöstäpoisto	25 %	0,4 %
laitteiden käyttöikä	30 a	30 a

⁵⁸ Epävarmuutta arvioon aiheuttaa se, kuinka paljon sähkönjakelulaitteiden kaasun käsittelyssä käytetään ulkomaalaisia huoltoyhtiöitä. Suomessa olevien talteenottojärjestelmien riittävydestä on esitetty hyvinkin poikkeavia näkemyksiä. Harnisch & Hendriks (2000) arvioivat, että lisäämällä talteenottojärjestelmien määrää Euroopassa 300 kappaleella voitaisiin SF₆-kaasupäästöjä pienentää Euroopassa noin 25 %. Tekijät katsoivatkin, että arvio Suomessa käytössä olevista järjestelmistä määrää karkeasti myös lisätarpeen.

⁵⁹ VHV = very high voltage; EHV = extra high voltage. VHV- ja EHV-laitteet ovat 123–420 kV:n laitteita.



Kuva 23. Perus- ja päästövähennysskenaario rikkiheksafluoridipäästöille sähkölaitteista.

Talteenottokäytäntöä laajentamalla saavutetaan Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020 noin 60 %:n päästövähennys. Taulukossa 30 esitetään vaihtoehtoisten skenaarioiden päästöt, vähennystoimien kustannustehokkuus tarkasteluvuosina (2012 ja 2020) ja niihin mennessä vähennystoimista kertyneet kokonaiskustannukset.

Taulukko 30. Sähkölaitteiden rikkiheksafluoridipäästöt vähennyskustannuksineen (laskentakorko 4 %) eri skenaarioissa vuosina 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja 2020.

vuosi	perusskenaario	vähennysskenaario	
	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	päästöt [kt CO ₂ -ekv.]	kustannukset [Mmk] [mk/t CO ₂ -ekv.]
1990	46	46	- -
2000	17	17	- -
KIOTO 1	38	16	<10 13
2020	65	25	<10 5

4.10 Muut SF₆-päästölähteet

Rikkiheksafluoridia käytetään sähkölaitteiden eristämisen, magnesiumin painevalu-prosessin suojaamisen ja puolijohdekomponenttien valmistuksen lisäksi myös muihin tarkoituksiin, joita ei kuitenkaan ole noteerattu Suomen virallisessa kasvihuone-kaasuinventaarissa (Ympäristöministeriö 2000), johtuen näiden päästöjen arvioidusta vähäisyydestä Suomessa.

Rikkiheksafluoridia on käytetty joissakin maissa (esimerkiksi Saksassa) autojen renkaiden ja äänieristettyjen ikkunalasien sekä urheilujalkineiden pohjien kaasutilojen ja

tennispallojen täyttämiseen⁶⁰ (Harnisch & Hendriks 2000, Pedersen 1998). Nämä päästölähteet aiheuttivat SF₆-päästöjä EU:n 15:ssä maassa noin 10,5 Mt CO₂-ekvivalenttia vuonna 1995, joka vastasi noin kolmasosaa EU:n kaikista SF₆-päästöistä (Harnisch & Hendriks 2000). Noin puolet tästä määrästä aiheutui Saksassa (Öko-Recherche 1999). Lisäksi SF₆-kaasua käytetään hyvin vähäisiä määriä muun muassa erilaisiin laboratoriotarkoituksiin, merkkiaineena ilman saasteiden kartoituksessa ja sotilastutkien aaltoputkien eristyskaasuna (Öko-Recherche 1999).

Suomessa rikkiheksafluoridia on tietävästi käytetty sähkölaitteiden, magnesiumin painevalun ja puolijohdekomponenttien valmistuksen lisäksi ainoastaan äänieristettyjen ikkunalasien valmistukseen. SF₆-kaasun äänieristyskyky perustuu hidastuneeseen äänen etenemisnopeuteen ilmaan verrattuna (liite I). Koska SF₆-kaasulla on myös hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, on sen lämmöneristyskyky alhainen. Tämän takia muun muassa Suomen ilmastollisissa olosuhteissa siihen on tavallisesti sekoitettu argonia, joka parantaa eristyskaasun lämmöneristystä. Argonin osuus seoskaasussa on yleensä noin kaksi kolmasosaa (Öko-Recherche 1999), (Ahokas 2000).

SF₆-kaasulla täytettyjen eristyslasien valmistus Suomessa aloitettiin 1980-luvun puolen välin tienoilla (Riikonen 2000). Tähän mennessä on valmistettu noin 15 000 m² eristyslaseja, joissa on käytetty noin 350 kg SF₆-kaasua parantamaan ääneneristävyyttä (Riikonen 2000). Eristyslasien valmistuksessa esiintyvistä täyttöhäviöistä johtuen elementtiä kohden käytetty SF₆-kaasumäärä on noin 30–60 % korkeampi kuin elementin kaasutilavuus edellyttää (Öko-Recherche 1999). Näin ollen Suomessa eristyslasien valmistuksessa käytetty SF₆-kaasumäärä on kokonaisuudessaankin alle 600 kg, joka vastaa vuosikulutuksena keskimäärin alle 40 kg. SF₆-kaasun käytön ääneneristyksen parantamiseen arvioidaan olevan vähenemässä, sillä toiminto voidaan aikaansaada myös esimerkiksi käyttämällä eristyslasissa eripaksuisia laseja ja välilistoja sekä laminaattilaseja.

Eristyslasien valmistuksen aikaiset päästöt ovat siis 30–60 % vuosittaisesta kulutuksesta. DIN 1286 (Teil 2) -standardin mukaan lasien maksimikaasuvuoto käytön aikana saa olla korkeintaan 1–1,2 % vuodessa (Öko-Recherche 1999). Näin ollen suurimmat päästöt aiheutuvat lasien rikkoutumisen tai käytöstäpoiston aikana. Eristyslasien tyypillinen käyttöikä Suomessa on 30–40 vuotta (Riikonen 2000). Suomessa SF₆-kaasulla täytettyjen eristyslasien sisältämä kokonaiskaasumäärä on niin vähäinen, ettei päästöskenaarion laatimista katsottu tässä työssä tarpeelliseksi.

⁶⁰ SF₆:n käyttö renkaissa, tennispalloissa ja kengänpohjissa perustuu kaasun alhaiseen diffuusioon kumista, jonka takia tuotteet kestävät paremmin kuin muilla kaasuilla täytetyt tuotteet. SF₆:n käyttö näissä sovelluksissa ollaan kuitenkin lähiaikoina kieltämässä (Harnisch & Hendriks 2000)

5. Uusien kaasujen päästövähennyspotentiaali ja -kustannukset

5.1 Perus- ja vähennysskenaarioiden kokonaispäästöt

Uusien kasvihuonekaasujen päästöjen arvioitiin vastaavan Suomessa vuonna 1999 noin 336 kt:a CO₂-ekvivalenttia. Arvo on noin 11 % pienempi kuin Suomen virallisessa kasvihuonekaasuinventaarissa (Ympäristöministeriö 2000) vuodelle 1999 ilmoitettu ensimmäinen (uusien kaasujen) aktuaalinen päästöarvio (noin 378 kt CO₂-ekv.). Päästöjen arvioitiin kasvavan viisinkertaisiksi, noin 1 700 kt CO₂-ekvivalenttiin, vuoteen 2010 mennessä. Kehitysarvio ennakoii puolestaan noin 24 % suurempia päästöjä vuonna 2010 kuin ensimmäinen Suomen uusien kaasujen aktuaalisia päästöjä koskeva kehitysarvio (noin 1 400 CO₂-ekv.) (Oinonen 2000). Ero johtuu pääasiassa tässä työssä ilmastonin jäädytykselle ja kaupan kylmälaitoksille arvioidusta kylmäainekulutuksen suuremmasta kasvusta sekä jääratojen ja joidenkin merkitykseltään vähäisempien sektoreiden huomioimisesta. Muilta osin kokonaispäästöjen kehitysennuste on hyvin lähellä Oinosen (2000) ilmoittamia arvioita, vaikka päästöjen laskentamenetelmät ja oletukset poikkeavat useassa kohdissa toisistaan.

Uusien kasvihuonekaasujen arvioitu nopea kasvu näyttää suurentavan niiden suhteellista osuutta Suomen kaikkien (Kioton pöytäkirjan mukaisten) kasvihuonekaasujen päästöarviointiin verrattuna (taulukko 31). Suhteellisen osuuden kasvu johtuu lähes yksinomaan HFC-yhdisteiden päästöille arvioidusta kasvusta. HFC-päästöjen ennakoitaan lähentyvän metaanipäästöjen tasoa ja olevan noin 60 % metaanipäästöistä vuonna 2020 (taulukko 31).

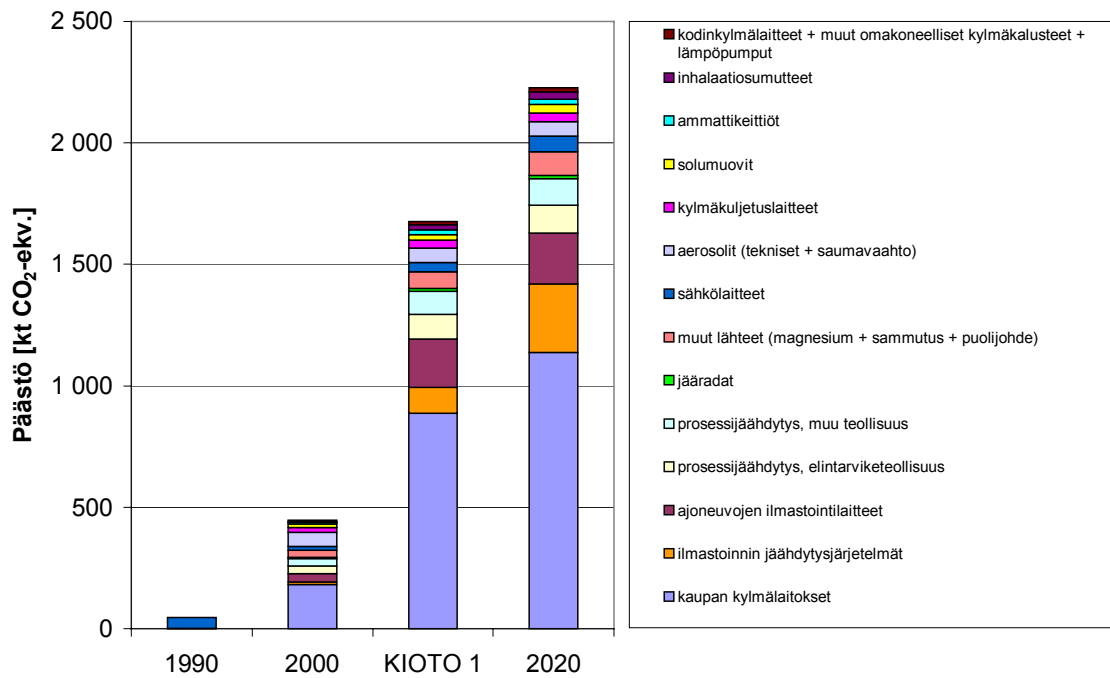
Taulukko 31. Kioton pöytäkirjan alaisten kasvihuonekaasujen perusskenaarion mukaiset päästöarviot kaasuittain Suomessa vuosina 1990, 1999, 2010 ja 2020.

Kioton pöytäkirjan mukaiset kasvihuonekaasut	1990	1999	2010	2020
hiilidioksidi (CO ₂) ^{*)}	61 800	64 100	76 500	81 800
metaani (CH ₄) ^{*)}	6 100	3 900	3 900	3 500
Dityppioksidi (N ₂ O) ^{*)}	8 400	7 700	8 000	8 200
HFC-yhdisteet	0	300	1 600	2 080
PFC-yhdisteet	0	<10	<10	20
rikkiheksafluoridi	50	40	100	130
uudet kaasut yhteensä	50	340	1 700	2 230
kaikki yhteensä	76 400	76 200	90 100	95 700
uusien osuus kaikista	0,07 %	0,44 %	1,89 %	2,33 %

^{*)} lähde: eri ministeriöiden sektorikohtaiset selvitykset (KTM 2001)

Uusien kasvihuonekaasujen perusskenaarion mukaiset päästöt tämän työn pääasiallisina tarkasteluvuosina esitetään kuvassa 24 ja taulukossa 32. Vuonna 1990 uusien kaasujen päästöt olivat hyvin vähäiset ja lähes kaikki päästöt aiheutuivat SF₆-eristeisistä

sähkölaitteista. Tällä hetkellä erilaisten kylmälaitteiden kylmäainepäästöt muodostavat arviolta noin 73 % päästöistä. Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020 kylmäainepäästöjen osuus uusien kaasujen päästöistä on arviolta noin 85–90 %. Näistä suurin osa koostuu kaupan kylmälaitosten (53–51 %), ajoneuvojen ilmastointilaitteiden (12–9 %) ja kiinteiden ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmien (12–9 %) päästöistä (kuva 24, taulukko 32).

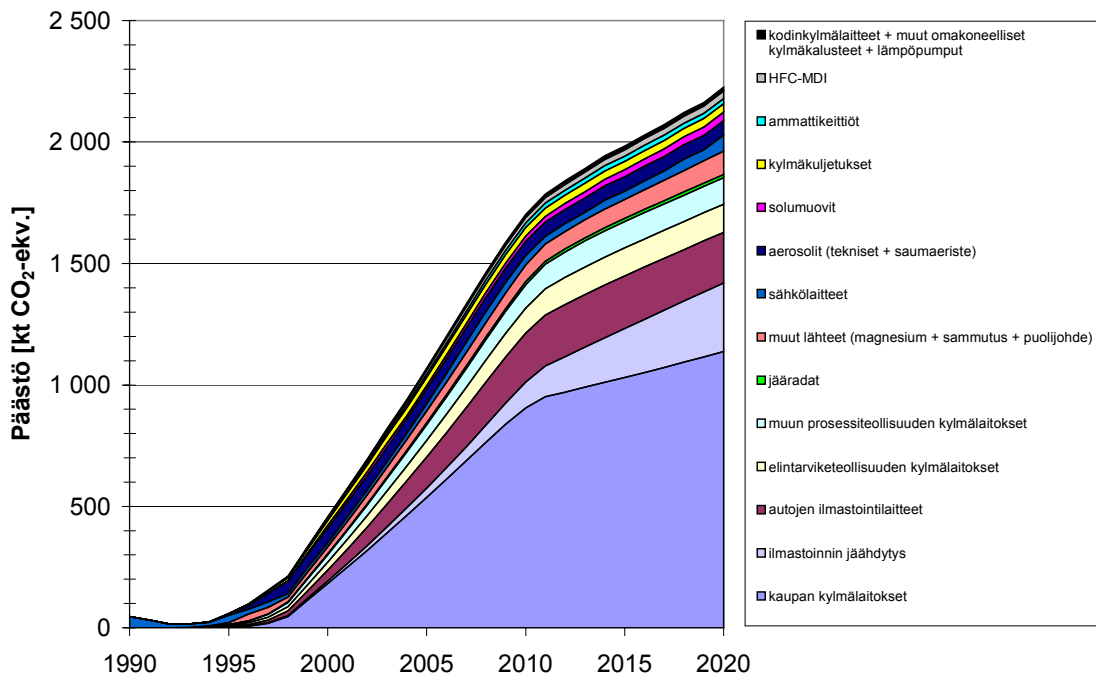


Kuva 24. Uusien kasviuonekaasujen päästöt sektoreittain vuonna 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella (2008–2012) ja vuonna 2020.

Taulukko 32. Uusien kasviuonekaasujen päästöt sektoreittain vuonna 1990, 2000, keskimääräisenä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella (2008–2012) ja vuonna 2020.

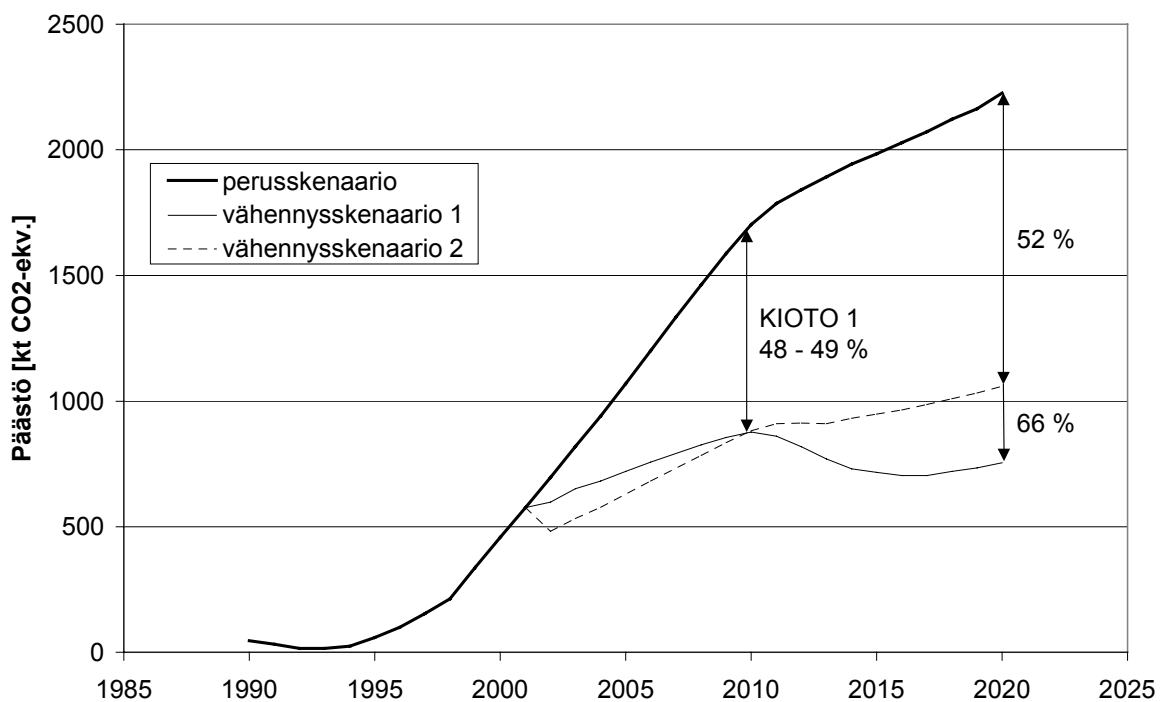
päästösektori	tarkastelukausi päästö / osuus	1990		2000		KIOTO 1		2020	
		[kt CO ₂ -ekv.]		[kt CO ₂ -ekv.]		[kt CO ₂ -ekv.]		[kt CO ₂ -ekv.]	
kodin kylmälaitteet		0	0 %	1	0 %	4	0 %	5	0 %
kaupan kylmälaitokset		0	0 %	182	41 %	886	53 %	1 138	51 %
elintarviketeollisuuden prosessijäähdytys		0	0 %	32	7 %	102	6 %	116	5 %
muun teollisuuden prosessijäähdytys		0	0 %	31	7 %	96	6 %	108	5 %
jääradat		0	0 %	4	1 %	12	1 %	13	1 %
ammattikeittiöt		0	0 %	6	1 %	19	1 %	21	1 %
omakoneelliset kylmäkalusteet		0	0 %	1	0 %	2	0 %	2	0 %
kylmäkuljetuslaitteet		0	0 %	20	4 %	35	2 %	35	2 %
kiinteät ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät		0	0 %	10	2 %	108	6 %	282	13 %
ajoneuvojen ilmastointilaitteet		0	0 %	34	8 %	198	12 %	209	9 %
pientalojen lämpöpumput		0	0 %	0	0 %	1	0 %	2	0 %
muut lämpöpumput		0	0 %	3	1 %	7	0 %	7	0 %
solumuovit		0	0 %	13	3 %	21	1 %	36	2 %
aerosolit (tekniset + saumaeriste)		0	0 %	59	13 %	59	4 %	59	3 %
inhalaatiosumutteet		0	0 %	5	1 %	22	1 %	31	1 %
muut lähteet (magnesium + sammutus + puolijohdet)		1	2 %	29	6 %	67	4 %	97	4 %
sähkölaitteet		46	98 %	17	4 %	38	2 %	65	3 %
YHTEENSÄ		47	100 %	468	100 %	1 676	100 %	2 125	100 %

Kuvassa 25 esitetään uusien kasviuonekaasujen perusskenaarion mukaiset päästöt sektoreittain. Päästöjen nopein kasvu taittuu selvästi ennen vuotta 2010, mikä on seurausta CFC- ja HCFC-kylmäaineiden nopeasta korvautumisesta HFC-yhdisteillä 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen aikana. Tämän jälkeen päästöjen kasvu johtuu lähinnä ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmien ja kaupan kylmälaitosten oletetusta lisääntyvästä käytöstä (kuva 25).



Kuva 25. Uusien kasviuonekaasujen päästöt sektoreittain vuosina 1990–2020.

Kylmä- ja ilmastointilaitteiden suhteellisen lyhyt käyttöikä antaa kuitenkin mahdollisuuden puuttua päästöjen kehitykseen verrattain nopealla aikataululla. Vaikka tehokkaiden päästövähennystoimenpiteiden (lähinnä tekniikoiden tai kylmäaineiden vaihtamiseen liittyvien menetelmien) soveltaminen käytössä olevaan kylmälaitekantaan on hankalaa, voidaan uusiin asennettaviin laitteisiin kohdistuvilla toimilla saavuttaa huomattavia päästövähennyksiä jo muutamassa vuodessa. On kuitenkin huomioitava, että mitä myöhempään ajankohtaan toimenpiteiden käyttöönotto ajoittuu, sitä korkeampi on päästöjen lähtötaso. Lisäksi uusiin laitteisiin sovellettavat päästövähennysmenetelmät saavuttavat täyden tehokkuutensa vasta silloin, kun koko laitekanta on uusiutunut. Kuvassa 26 esitetään uusien kasvihuonekaasujen päästöjen perus- sekä tehokkain laadittu vähennysskenaario (1) ja sille vaihtoehtoinen pelkästään vuotojen vähentämiseen perustuva skenaario (2). Vähennysskenaario 1 on laadittu valitsemalla mukaan ne kullekin sektorille esitetyt päästövähennystoimet, joilla on saavutettavissa suurin päästövähennys Kioto-ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020. Pääsääntöisesti toimet on arvioitu otettavan käyttöön vuoden 2002 alusta alkaen.



Kuva 26. Uusien kasvihuonekaasujen perus- sekä vähennysskenaarioiden 1 (mukaan valittu suurimman päästövähennyspotentiaalinen omaavat keinot) ja 2 (vuotojen vähentämiseen johtavat toimet) vertailu.

Tässä työssä esitettävillä päästövähennystoimilla on mahdollista leikata arviolta noin puolet päästöistä Kioto-ensimmäisellä velvoitekaudella ja maksimissaan kaksi kolmasosaa vuoden 2020 tasossa (kuva 26). Arvion mukaan päästöt kasvavat nykyisestä noin 460 kt:n CO₂-ekvivalentista noin 65 % vuoteen 2020 mennessä myös tehok-

kaimman vähennysskenaarion tapauksessa. On huomioitava, että kaikille päästösektoreille ei esitetä päästövähennysskenaariota, mikä johtuu vähennystoimenpiteiden sovellettavuuteen ja saavutettaviin päästövähennyksiin liittyvästä tiedon puutteesta. Näiden sektoreiden yhteenlaskettu osuus uusien kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä on tällä hetkellä noin 25 %. Tämän osuuden ennakoidaan alenevan Kioton ensimmäisen velvoitekauden ja vuoden 2020 tasossa arviolta 10 %:iin, joten kovin suuria päästövähennyksiä kokonaisuuden kannalta ei näissä sektoreissa voida saavuttaa.

5.2 Päästövähennyskustannukset

Päästövähennyskustannukset laskettiin niille sektoreille esitetyistä toimista, joille laadittiin päästövähennysskenaariot. Selvityksen tuloksena syntyneet arviot päästövähennyskeinojen kustannustehokkuudesta, aiheutuvista kokonaiskustannuksista ja vähennyspotentiaaleista esitetään taulukossa 33.

Taulukko 33. Yhteenveto vähennyskeinojen kustannuksista ja vähennyspotentiaalista Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020 (laskentakorko 4 %).

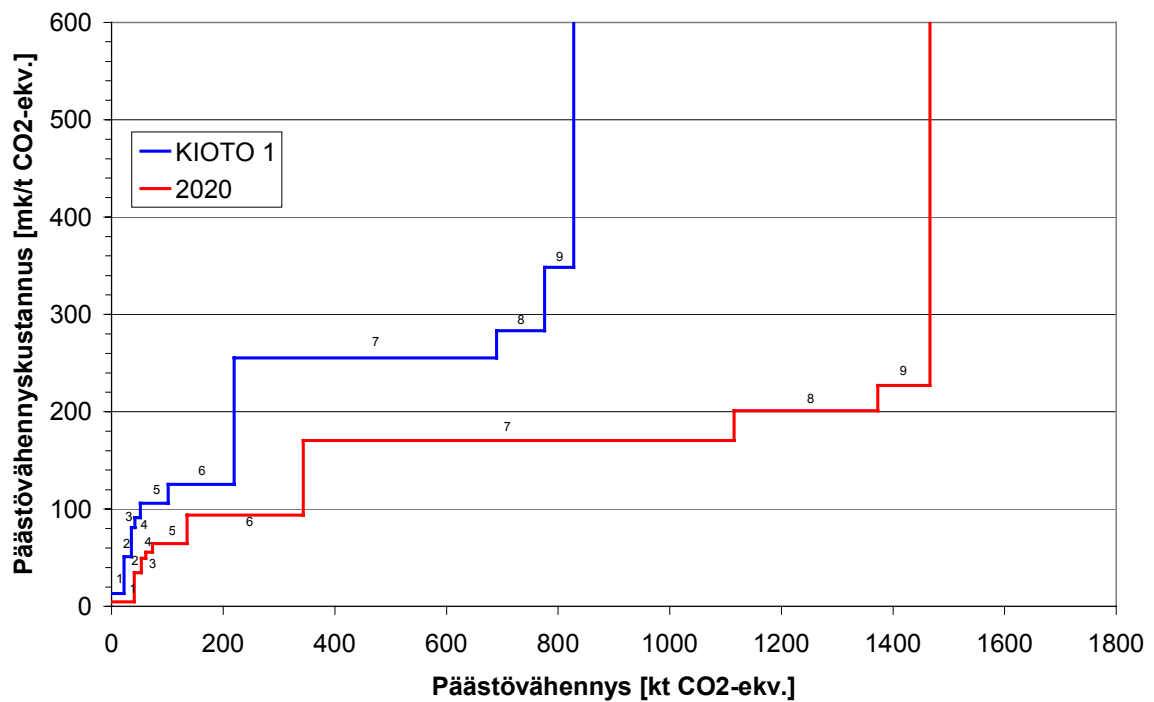
sektori (päästövähennyskeino)	Kustannustehokkuus [mk/t CO ₂ -ekv.]		Kokonaiskustannus [Mmk]		Absoluuttinen päästövähennys [kt CO ₂ -ekv.]	
	KIOTO 1	2020	2012	2020	KIOTO 1	2020
kodin kylmälaitteet (isobutaani)	22 000	5 600	300	450	~ 0	< 10
kaupan kylmälaitokset (välillinen HFC-järjestelmä)	260	170	1 080	2 080	470	770
kaupan kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)	70	50	300	530	480	650
elintarviketeoll. prosessijäähdytys (NH ₃ tai HC:t)	350	230	160	330	50	90
elintarviketeoll. prosessijäähdytys (vuotojen vähentäminen)	80	50	40	70	50	70
muun teoll. prosessijäähdytys (NH ₃ tai HC:t)	90	70	20	30	20	30
muun teoll. prosessijäähdytys (vuotojen vähentäminen)	110	70	50	90	50	60
jääradat (vuotojen vähentäminen)	80	50	<10	10	<10	10
ammattikeittiöt (vuotojen vähentäminen)	90	60	<10	20	10	10
kylmäkuljetukset (vuotojen vähentäminen)	50	30	<10	10	10	10
ilmastoinnin jäähdytys (välillinen NH ₃ - tai HC-järjestelmä)	280	200	280	620	90	260
ilmastoinnin jäähdytys (vuotojen vähentäminen)	250	170	120	320	60	160
ajoneuvojen ilmastointi (CO ₂ -järjestelmä)	130	90	170	290	120	210
ajoneuvojen ilmastointi (parannettu HFC-134a-järjestelmä)	40	30	40	70	110	140
sähkölaitteet (parannettu talteenotto)	10	<10	<10	<10	20	40
YHTEENSÄ:						
vähennysskenaariota 1 vastaavat toimet	255 ^{*)}	174 ^{*)}	2 070	3 890	830	1 470
vähennysskenaariota 2 vastaavat toimet	79 ^{*)}	61 ^{*)}	860	1 510	780	1 140

^{*)} päästövähennemällä painotettu keskiarvo

Vähennyskeinojen kustannustehokkuus vaihteli alle kymmenestä markasta noin 350 markkaan hiilidoksidiekvivalenttitonnia kohden. Poikkeuksen muodostivat kodin kylmälaitteet, joiden päästövähennyskustannukset nousivat erittäin korkeiksi (ks. kohta 4.1.5.4). Vertailtaessa tietyille kylmälaitesektoreille arvioituja vaihtoehtoisia vähennys-

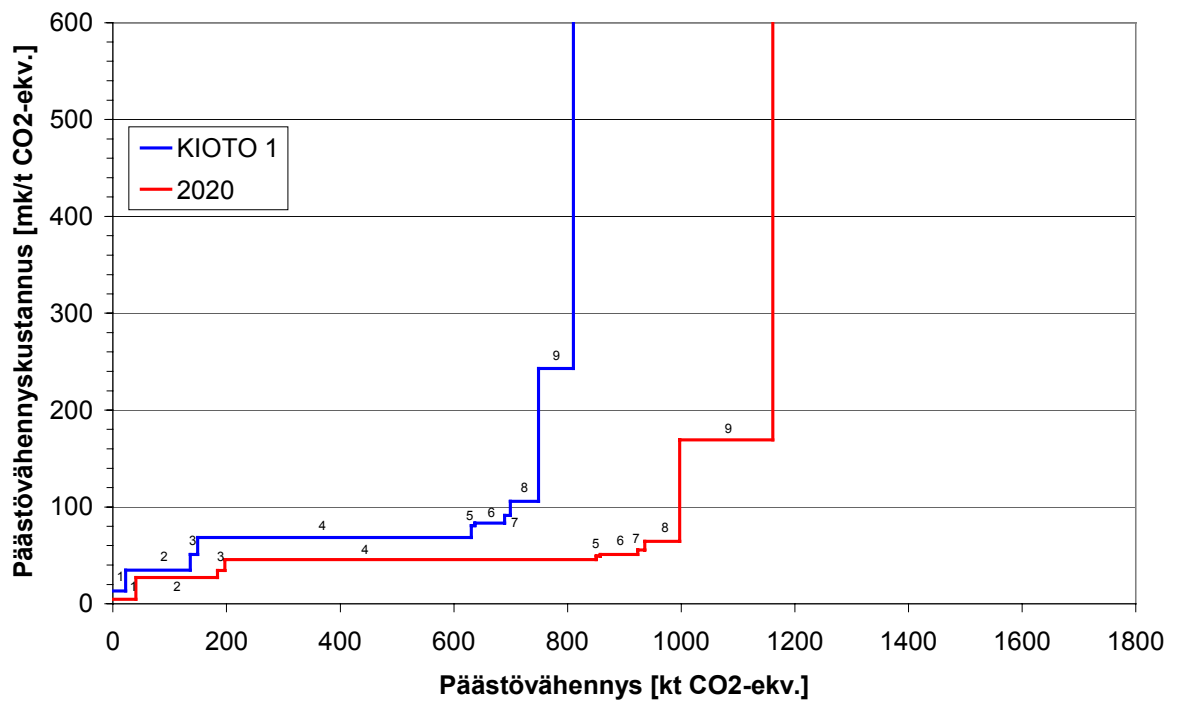
toimia keskenään voidaan taulukosta 33 havaita, että saavutettavat päästövähennykset ovat Kioto-ensimmäisen velvoitekauden tasossa likimain yhtäläiset. Vaihtoehtoisten tekniikoiden tai kylmäaineiden onnistuneella käyttöönotolla voitaisiin vuoteen 2020 mennessä saavuttaa arvion mukaan jo suurempia päästövähennyksiä kuin pelkkiä vuotoja vähentämällä. Vuotojen vähentämistoimien aiheuttamat kokonaiskustannukset ja saavutettavien päästövähennysten kustannustehokkuus ovat kuitenkin huomattavasti alhaisemmat kuin välillisten järjestelmien ja luonnollisten kylmäaineiden käyttöönoton.

Kuvassa 27 esitetään tehokkaimman päästövähennysskenaarion (1) mukaista tilannetta vastaava saavutettavien päästövähennysten määrä kustannustehokkuuden funktiona Kioto-ensimmäisen velvoitekauden ja vuoden 2020 tasossa. Vastaava vertailu pelkästään vuotojen vähentämiseen liittyvien toimien tilanteelle esitetään kuvassa 28. Kuvista voidaan havaita, että vaihtoehtoisilla menetelmillä saavutettavissa olevissa päästövähennyksissä on merkittävä ero, kun päästövähennyskustannukset ovat noin 100 mk/t CO₂-ekv. Vähennysskenaarion 1 mukaisessa tilanteessa (kuva 27) voidaan päästöjä vähentää suhteellisen kustannustehokkaasti (alle 200 mk/t CO₂-ekv.) noin 200 kt CO₂-ekvivalenttia Kioto-ensimmäisen velvoitekauden ja noin 1 000–1 400 kt CO₂-ekvivalenttia vuoden 2020 tasossa. Vähennysskenaarion 2 mukaisessa tilanteessa (kuva 28) vastaavat suhteellisen kustannustehokkaat päästövähennykset ovat noin 700 (KIOTO 1) ja 1 000 (vuonna 2020) kt CO₂-ekvivalenttia kustannustehokkuuden ollessa lisäksi alle 100 mk/ t CO₂-ekv.



- 1 = sähkölaitteet (parannettu talteenotto)
- 2 = kylmäkuljetuslaitteet (vuotojen vähentäminen)
- 3 = jääratojen kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)
- 4 = ammattikeittiöiden kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)
- 5 = muun teollisuuden prosessijäähdytys (kylmäaineen korvaaminen ammoniakilla tai hiilivedyillä vedenjäähdyttimissä)
- 6 = ajoneuvojen ilmastointilaitteet (CO₂-järjestelmän käyttöönotto)
- 7 = kaupan kylmälaitokset (välillinen HFC-järjestelmä suurissa laitoksissa)
- 8 = ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät (kylmäaineen korvaaminen ammoniakilla tai hiilivedyillä)
- 9 = elintarviketeollisuuden prosessijäähdytys (välillinen HFC-, ammoniakki- tai hiilivetyjärjestelmä)

Kuva 27. Päästövähennysten toteuttaminen valitsemalla ensisijaisesti vaihtoehtoisia kylmäaineita ja jäähdytystekniikoita.



- 1 = sähkölaitteet (parannettu talteenotto)
- 2 = ajoneuvojen ilmastointilaitteet (parannettu HFC-134a-järjestelmä)
- 3 = kylmäkuljetuslaitteet (vuotojen vähentäminen)
- 4 = kaupan kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)
- 5 = jääratojen kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)
- 6 = elintarviketeollisuuden prosessijäähdytys (vuotojen vähentäminen)
- 7 = ammattikeittiöiden kylmälaitokset (vuotojen vähentäminen)
- 8 = muun teollisuuden prosessijäähdytys (vuotojen vähentäminen)
- 9 = ilmastoinnin jäähdytys (vuotojen vähentäminen)

Kuva 28. Päästövähennysten toteuttaminen vuotoja vähentämällä.

6. Päästövähennystoimien yritysvaikutuksista

Tässä työssä kuvattavien teknisten päästövähennyskeinojen käyttöönotto voi vaikuttaa yritysten liiketoimintaan. Tietyn päästövähennystoimen käyttöönotolla saattaa olla taloudellisia vaikutuksia jopa useaan eri ja erityyppiseen yritykseen. Vaikutukset voivat olla joko negatiivisia tai positiivisia (päästövähennystoimen käyttöönotosta aiheutuu yritykselle kustannuksia tai hyötyä). Ongelmakenttä on kuitenkin niin laaja ja moninainen, että yksityiskohtainen vaikutusanalyysi ylittää tämän työn tekemiseen varatut resurssit. Seuraavassa tyydytäänkin kvalitatiivisesti pohtimaan sitä, minkä-tyyppiset yritykset mahdollisesti hyötyisivät toimenpiteistä ja kenelle puolestaan koituisi kustannuksia. Muun kaltaisten päästöjä rajoittavien toimenpiteiden, kuten yhdisteiden käyttökieltojen tai käytön verottamisen, yritysvaikutuksia ei tässä työssä tarkastella.

6.1 Vaikutukset toimenpiteitä käyttöönettaviin yrityksiin

Lähtökohtaisesti tilannetta voidaan tarkastella päästövähennystoimenpiteen käyttöönottan yrityksen näkökulmasta. Pääsääntöisesti toimenpiteen käyttöönotto aiheuttaa yritykselle kustannuksia, koska se joutuu investoimaan teknisiin muutoksiin. Lisäksi yritykselle saattaa koitua muuttuvia kustannuksia toimenpiteen käytönajalta. Joissakin tapauksissa muuttuvat kustannukset saattavat olla negatiiviset, jolloin yritys voi kuolettaa osan tekemistään investoinneista. Mikäli negatiiviset muuttuvat kustannukset kuolettavat investoinnit kokonaan ja rupeavat myöhemmin tuottamaan yritykselle voittoa, ei enää tarkastella pelkästään päästövähennystoimenpiteen käyttöönottoa vaan mahdollisesti myös taloudellisesti kannattavaa sijoitusta. Tämäntyyppinen tilanne saattaa syntyä esimerkiksi yhdisteiden kulutusta merkittävästi säästävän teknisen muutoksen tai ympäristömyönteisemmästä toimintatavasta syntyneen kilpailuaseman vankistumisen seurauksena. Edellä mainitut seikat ovat kuitenkin täysin yrityskohtaisia ja yleensä myös yritysten tarkkaan varjelemia liikesalaisuuksia, joten niiden pohdinta jätetään tämän työn tarkastelujen ulkopuolelle.

Päästövähennyskeinojen vaikutus toimenpiteen käyttöönettävään yritykseen riippuu myös yrityksen koosta ja taloudellisesta tilanteesta. Tässä työssä esitettyjen päästövähennystoimien käyttöönoton kustannukset saattavat koitua liian suuriksi etenkin joillekin pienille yrityksille. Mikäli aiheutuvat kustannukset joudutaan kuolettamaan nostamalla tuotteiden tai palveluiden hintoja, saattaa yrityksen liiketoiminnalle aiheutua merkittäviä haittoja. Jos esimerkiksi samalla alalla toimiva suurempi yritys onnistuu kuolettamaan päästövähennystoimenpiteestä aiheutuvat kustannukset halvemalla suhteessa tuotteen tai palveluun, saattaa sille koitua suhteellista markkinaetua. Vastaavanlainen on

tilanne, mikäli markkinoilla toimivista yrityksistä vain osa ottaa päästövähennystoimenpiteen käyttöön.

6.2 Vaikutukset muihin yritystyyppihin

Päästövähennystoimien yritysvaikutukset eivät rajoitu ainoastaan toimenpiteet käyttöönottaviin yrityksiin tai niiden kilpailijoihin vaan myös muihin yritystyyppihin, jotka eivät suoranaisesti kilpaile samoilla markkinoilla. Tässä kohdassa pyritään karkealla tasolla kuvaamaan erityyppisiä yrityksiä, joita tietynlaisen päästövähennystoimen käyttöönoton vaikutuspiiriin kuuluu.

Yritystyyppit voidaan jakaa valmistajiin ja maahantuojiin sekä muihin yrityksiin, joihin lukeutuvat urakoitsijat, huoltoyritykset, jätehuoltoyritykset ja tuotteita tai laitteita käyttävät yritykset (taulukko 34). Valmistajia ja maahantuojia on myös lukuisia eri tyyppisiä. Yritys voi esimerkiksi tuoda maahan kemikaaleja (taulukkoissa 34 ja 35 viitataan tässä tapauksessa HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n maahantuontiin) tai kemikaaleja sisältäviä tuotteita tai laitteita. Maahan tuodaan myös laitteita, jotka eivät sisällä kemikaaleja maahan tuotaessa mutta jotka täytetään asennuksen yhteydessä. Lisäksi maahan tuodaan komponentteja, joista kootaan laitoksia ja joihin asennetaan kemikaaleja käyttöönottovaiheessa.

Taulukossa 34 kuvataan vaikutuksia, joita *vaihtoehtoisten tekniikoiden ja aineiden käyttöönotolla* saattaisi olla kunkintyyppiseen yritykseen Suomessa. Taulukon merkinnöissä:

- ”ER” tarkoittaa sitä, että kyseinen yritystyyppi ei ole relevantti lähteen kannalta (huoltoyritykset eivät esimerkiksi ole relevantteja aerosolituotteiden kannalta).
- ”0” tarkoittaa sitä, että päästölähteeseen kohdistettava toimenpide ei todennäköisesti vaikuta kyseisen yritystyyppin yrityksiin Suomessa.
- ”-” tarkoittaa sitä, että päästölähteeseen kohdistettava toimi todennäköisesti vaikuttaisi negatiivisesti yritystyyppin yrityksiin (vähentäisi esimerkiksi teollisuudelle myytävien kemikaalien määriä).
- ”+” tarkoittaa sitä, että päästölähteeseen kohdistettava toimi vaikuttaa positiivisesti yritystyyppin yrityksiin (esimerkiksi vuotojen vähentämiseen tähtäävien toimien käyttöönotto lisää huoltoyritysten palveluiden kysyntää).

Taulukko 34. Vaihtoehtoisten aineiden ja teknikoiden käyttöönoton mahdolliset vaikutukset kunkin yritystyyppin yrityksiin Suomessa. ER = yritystyyppi ei ole relevantti päästölähteen kannalta; 0 = toimilla ei todennäköisesti ole vaikutusta yritystyyppin yrityksiin; - = toimilla on todennäköisesti negatiivinen vaikutus yritystyyppin yrityksiin; + = toimilla on todennäköisesti positiivinen vaikutus yritystyyppin yrityksiin.

yritystyyppi	päästölähde				
	kylmä- ja ilmastointilaitteet	solumuovieristeet	sammutuslaitteet	aerosolit	puolijohteet
valmistajat ja maahantuojat					
- kemikaalit	-	0	ER	-	0
- valmistusvaiheessa täytettävät laitteet	- / +	-	ER	ER	ER
- asennusvaiheessa täytettävät laitteet	- / +	-	-	ER	ER
- kaasun käsittely- ja talteenottolaitteet	0	0	0	ER	0
- komponentit	- / +	ER	-	ER	ER
- kemikaaleja sisältävät tuotteet	ER	0	ER	-	ER
- kemikaaleja sisältämättömät tuotteet (prosessikaasuna HFC/PFC/SF ₆)	ER	-	ER	-	-
muut yritykset					
- urakoitsijat	0	0	-	ER	0
- huoltoyritykset	0 / +	ER	-	ER	0
- jätehuoltoyritykset	0	0	0	ER	0
- tuotteita tai laitteita käyttävät yritykset	-	-	-	-	-

Taulukossa 35 kuvataan vastaavasti vaikutuksia, joita *vuotojen vähentämistoimenpiteillä* saattaisi olla kunkintyyppiseen yritykseen Suomessa. Merkinnät ovat samat kuin taulukossa 34.

Taulukko 35. Vuotojen vähentämistoimenpiteiden käyttöönoton mahdolliset vaikutukset kunkin yritystyyppin yrityksiin Suomessa. ER = yritystyyppi ei ole relevantti päästölähteen kannalta; 0 = toimilla ei todennäköisesti ole vaikutusta yritystyyppin yrityksiin; - = toimilla on todennäköisesti negatiivinen vaikutus yritystyyppin yrityksiin; + = toimilla on todennäköisesti positiivinen vaikutus yritystyyppin yrityksiin.

yritystyyppi	päästölähde				
	kylmä- ja ilmastointilaitteet	sähkölaitteet	solumuovieristeet	sammutuslaitteet	puolijohteet
valmistajat ja maahantuojat					
- kemikaalit	-	-	ER	-	- / 0
- valmistusvaiheessa täytettävät laitteet	- / +	-	ER	ER	ER
- asennusvaiheessa täytettävät laitteet	- / +	-	ER	-	ER
- kaasun käsittely- ja talteenottolaitteet	+	+	+	+	+
- komponentit	+	0	ER	+	+
- kemikaaleja sisältävät tuotteet	ER	ER	ER	ER	ER
- kemikaaleja sisältämättömät tuotteet (prosessikaasuna HFC/PFC/SF ₆)	ER	ER	ER	ER	-
muut yritykset					
- urakoitsijat	0 / +	0	0	0	0
- huoltoyritykset	+	+	ER	+	ER
- jätehuoltoyritykset	+	+	+	+	+
- tuotteita tai laitteita käyttävät yritykset	- / +	-	-	-	-

Taulukoiden 34 ja 35 merkinnöistä on lisäksi huomattava, että useammassa tapauksessa vaikutukset yritykseen saattavat olla negatiivisia tai positiivisia; esimerkiksi jotkut maahantuojat saattavat hyötyä toimenpiteen seurauksena, toiset taas saattavat menettää markkinaosuuksiaan, jolloin vaikutus voi olla vähäinen ajatellen kaikkia tietyn yritystyyppin yrityksiä. Kyseessä on monesti hyvin tulkinnanvarainen asia, ja taulukoiden merkinnätkin ovat näin ollen vain suuntaa-antavia. Selvää kuitenkin on, että joidenkin lähteiden osalta tietyn tyyppiset yritykset eivät ole relevantteja (ER), joten näihin yrityksiin ei myöskään kohdistu minkäänlaisia vaikutuksia toimenpiteen seurauksena.

Tuotteita valmistaviin tai maahantuoviin yrityksiin kohdistuvat vaikutukset riippuvat täysin siitä, perustuuko yrityksen myymän tavaran tuotanto HFC- tai PFC-yhdisteiden tai SF₆:n käytölle vai ei. Yritystyyppien joukosta erottuvat kuitenkin jäte- ja muut huoltoyritykset sekä kaasun talteenottolaitteita maahantuovat ja valmistavat yritykset, jotka ovat vuotojen vähentämiseen liittyvien päästönhallintatoimien tapauksessa selviä hyötyjiä.

Vuotojen vähentämistapauksessa kylmä- ja ilmastointilaitteita maahantuovien ja valmistavien yritysten joukossa on todennäköisesti hieman enemmän toimenpiteistä hyötyviä yritystyyppinä kuin negatiivisia vaikutuksia kokevia yrityksiä. Vaihtoehtoisten tekniikoiden ja aineiden osalta tilanne on huomattavasti epämääräisempi. Tässä tapauksessa vaikutukset ovat joko vähäisiä (vaikutuksen suunnan määrittäminen on vaikeata) tai yritystyyppin yrityksistä osa hyötyy ja osalle koituu haittoja. Urakoitsijat saattavat hyötyä tiiviimpien laitoskonstruktioiden rakentamistarpeesta.

Sähkölaitteiden osalta vuotojen vähentämisen tilanne muistuttaa paljon kylmä- ja ilmastointilaitteita: kemikaaleja maahantuovat sekä laitteita maahantuovat ja valmistavat yritykset todennäköisesti kokevat negatiivisia vaikutuksia, mutta kaasun käsittely- ja talteenottolaitteita maahantuovat ja valmistavat yritykset hyötynevät vuotojen vähentämistoimenpiteiden käyttöönotosta. Lisäksi huolto- sekä jätehuolto-yritykset kuuluvat hyötyjien joukkoon. Sähkölaitteiden komponenttivalmistajiin tilanne ei varmaankaan juuri vaikuta, koska vuotojen vähentämistoimenpiteet kohdistuvat ensisijaisesti päästöjen hallintamekanismeihin.

Solumuovieristeet eivät juurikaan ole vuotojen vähentämistoimenpiteiden osalta relevantteja, vaikkakin on ajateltavissa, että näistäkin tuotteista voidaan ottaa ponneaine talteen, mistä koituu kustannuksia tuotteen omistajalle ja toisaalta hyötyä talteenottolaitteita valmistaville ja maahantuoville yrityksille. Solumuovieristeitä valmistaville yrityksille puolestaan aiheutuu poikkeuksetta kustannuksia, mikäli tuotantoprosessia muutetaan siten, että vaihtoehtoisen paisutusaineen käyttö on mahdollista. Tämä näkyy useina miinuksina taulukossa 35.

Automaattisten sammutuslaitteiden osalta vaikutukset eivät ole monessa tapauksessa relevantteja tiettyjen yritystyyppien osalta, mutta muuten päästövähennystoimenpiteistä aiheutunee pääasiassa kustannuksia sekä laitteiden omistajille että niitä myyville yrityksille.

Aerosolien päästöihin ei vuotojen vähentämistoimilla voida juurikaan vaikuttaa. Mikäli vaihtoehtoisten tekniikoiden tai ponneaineiden käyttöönotto on mahdollista, aiheutuu toimenpiteestä todennäköisesti pääasiassa negatiivisia vaikutuksia erityyppisille yrityksille.

Puolijohteiden valmistukseen liittyvät parannetut päästöjen hallintamekanismit aiheuttavat pääsääntöisesti kustannuksia puhtaamman tuotantotekniikan käyttöönottajalle. Vaihtoehtoisten tekniikoiden ja aineiden osalta vaikutuksille on vaikea määrätä suuntaa pääasiassa alan nopean kehityksen vuoksi.

Tuotteita valmistavien ja palveluita tarjoavien yritysten osalta on huomattava lisäksi, että mikäli muualla kuin Suomessa toteutetaan vastaavia päästönvähennystoimia, saattaa siitä avautua vientimahdollisuuksia suomalaiselle teknologialle ja osaamiselle. Tässä työssä varsinaisia suomalaisia teknologioita ei kuitenkaan tunnistettu. Itse asiassa useat tekniset ratkaisut päästöjen vähentämiseksi on alun perin tai kokonaan ulkomaalaisten ja monikansallisten yhtiöiden kehitystyön tulosta. Osaltaan tämä johtunee siitä, että uusien kasvihuonekaasujen päästöjä aiheuttavat teollisuuden alat esiintyvät huomattavasti suuremmassa mittakaavassa joissakin muissa teollisuusvaltioissa, joissa siten myös kaasujen kulutuksen ja päästöjen vähennystarve on suurempi ja vähennystekniikoiden kehitystyöhön panostetaan enemmän. Lisäksi kylmäainepäästöjen vähentämisessä mahdollisesti käyttöönotettavat uudet vaihtoehtoiset tekniikat tai kylmäaineet ovat useassa tapauksessa (etenkin ilmastoinnin jäähdytyksen yhteydessä) nopeammin sovellettavissa Suomen ilmastollisiin olosuhteisiin kuin kuumempiin ilmastoihin, joissa jäähdytyskausi on pidempi⁶¹.

Markkinoita päästöjä vähentävälle teknologialle voisi löytyä luonnollisesti sellaisista maista, joissa otsonia heikentävien yhdisteiden käyttö on vielä voimakkaassa roolissa. Mikäli tällaisten yhdisteiden käyttöä voidaan korvata osittain tai kokonaan halogenoiduille yhdisteille vaihtoehtoisia tekniikoita tai aineita soveltamalla, voidaan menetelmillä ehkäistä mahdollista tulevaa HFC- ja PFC-yhdisteiden käyttöä.

⁶¹ Mitä lyhyempi tarvittavan on jäähdytyksen huipunkäyttöaika, sitä vähemmän merkitystä on tuotetun jäähdytyksen energiankulutuksella. Vaihtoehtoiset tekniset ratkaisut ja kylmäaineet saattavat lisätä energiankulutusta referenssijärjestelmään verrattuna.

7. Yhteenveto ja johtopäätökset

Uusien kasviuonekaasujen – HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä rikkiheksafluoridin (SF₆) – päästöt aiheuttavat tällä hetkellä maailmanlaajuisesti noin 0,9 % kaikista ihmisen toiminnan aiheuttamista kasviuonekaasupäästöistä. Suomen uusien kaasujen päästöt vastaavat noin 0,6 %:a Suomen kaikkien Kioton pöytäkirjan mukaisten kasviuonekaasujen päästöistä. Tämän osuuden ennakoitaan kuitenkin kasvavan lähivuosien aikana noin 2 %:iin, jolloin uusien kaasujen päästöjen merkitys Suomen Kiotovelvoitteiden kannalta olisi paljon nykyistä suurempi. Mikäli Kioton pöytäkirja ratifioidaan ja päästövähennysvelvoitteet astuvat voimaan, merkitsee uusien kaasujen päästöjen kasvu sitä, että päästövähennyksiä on lisättävä muilla sektoreilla, ellei uusien kaasujen päästöjen kasvua voida hillitä.

Uusien kasviuonekaasujen päästöt aiheutuvat useasta toisistaan merkittävästi poikkeavasta lähteestä. Päästölähteissä ja niiden merkityksessä kokonaisuuteen nähden on myös huomattavia eroja eri maiden välillä riippuen lähinnä maiden teollisuuden rakenteesta. Esimerkiksi EU:n uusien kaasujen keskimääräisiin päästöihin vaikuttaa tällä hetkellä voimakkaasti otsonia tuhoavien yhdisteiden korvaamisen (pääasiassa HFC-yhdisteillä) lisäksi HCFC-22:n teollisessa tuotannossa sivutuotteena syntyvän HFC-23:n ja alumiinin primäärituotannossa syntyvien PFC-yhdisteiden päästöt. Näitä teollisuuden aloja ei esiinny Suomessa.

1990-luvun alussa Suomen uusien kasviuonekaasujen päästöt aiheutuivat lähes yksinomaan sähkönjakelulaitteiden asennuksen, käytön ja käytöstäpoiston aikana vapautuvasta SF₆-kaasusta. Vuosikymmenen aikana alkoi otsonia heikentävien yhdisteiden korvaaminen HFC-yhdisteillä ja vähäisemmässä määrin myös PFC-yhdisteillä. Tällä hetkellä kylmä- ja ilmastointilaitteista sekä lämpöpumpuista vapautuvat kylmäaineet muodostavat noin 73 % sekä aerosolien ja solumuovien punneaineet noin 17 % päästöistä. CFC- ja HCFC-kylmäaineiden käytön korvautuminen tulee jatkumaan vielä vuosia. Yhdessä jäähdytystarpeen ennakoitun lisääntymisen kanssa tämä kasvattaa HFC-kylmäainepäästöjä ja niiden suhteellista osuutta uusien kasviuonekaasujen päästöistä lähelle 90 %. Suomessa aerosolien CFC- ja HCFC-punneaineiden käytöstä on inhalaatiosumutteita lukuun ottamatta jo luovuttu, joten aerosolien osalta HFC-yhdisteiden päästöjen merkittävää kasvua ei ole näköpiirissä. Tulevaisuudessa HFC-yhdisteillä vaahdotettujen eristesolumuovien solukoissa olevat punneaineet muodostavat käytöstäpoiston yhteydessä vapautuessaan merkittävän päästölähteen, mikäli HFC-yhdisteiden käyttö saavuttaa oleellisen markkina-aseman tällä sektorilla. Solumuovien punneaineiden HFC-päästöt eivät kuitenkaan muodostane kovin merkittävää osuutta uusien kaasujen päästöistä vuoteen 2020 mennessä.

Perusskenaariossa päästömääriä pienentäviä teknologisia muutoksia ei oletettu tapahtuvan (lukuun ottamatta ajoneuvojen ilmastointilaitteet, ks. kohta 4.1.12). Sen sijaan CFC- ja HCFC-kylmäaineiden talteenottoa (laitteita tai laitoksia käytöstä poistettaessa) koskevan lainsäädännön oletettiin muuttuvan koskemaan myös HFC-kylmäaineita (ks. kohta 3.2.1). Mikäli talteenottoa ei käytöstäpoiston yhteydessä toteutettaisi lainkaan, olisivat uusien kaasujen päästöt Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella noin 15 % ja vuonna 2020 noin 30 % arvioituja suuremmat.

Kaupan kylmlaitokset muodostavat tällä hetkellä arviolta noin 40 % koko kylmäsektorin päästöistä. Ilman päästövähennystoimia tämän osuuden ennakoidaan kasvavan tulevaisuudessa, vaikka sitä hieman hidastaakin sekä rakennusten että ajoneuvojen ilmastoinnin jäädytyksen arvioitu verrattain nopea yleistyminen. Kaupan kylmlaitokset muodostaisivat arviolta noin 50 % kaikista uusien kasvihuonekaasujen päästöistä sekä Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella että vuonna 2020, mikäli vähennystoimia ei toteutettaisi.

Uusien kasvihuonekaasujen päästöjen vähennystarve Suomessa liittyy siis ennen kaikkea kylmäsektorin päästöihin. Päästövähennyskenaarioissa tarkasteltiin sitä, kuinka paljon päästöjä voitaisiin tietyillä teknisillä toimilla vähentää perusskenaariota vastaavasta. Vähennyskenaarioihin valitut päästöjen vähennystoimet liittyivät kylmäaineen korvaamiseen tai täytöksen pienentämiseen välillisillä järjestelmillä sekä vuotojen vähentämiseen. Koska halogenoiduille yhdisteille vaihtoehtoiset (riittävän tehokkaat) kylmäaineet ovat usein palavia tai myrkyllisiä, ei niiden avulla voida korvata HFC-yhdisteiden kulutusta kaikissa sovelluksissa. Lisäksi välillisten järjestelmien käyttöönotto lisää laitosten energiankulutusta ja aiheuttaa siten hiilidioksidipäästöjä. Vuotojen vähentämistoimiin ei edellä mainittuja haittoja sisälly, mutta toimien avulla saavutettavat HFC-päästövähennykset ovat myös pienemmät kuin vaihtoehtoisia kylmäaineita tai tekniikoita käyttämällä.

Tässä selvityksessä arvioituilla kylmä- ja ilmastointilaitteisiin kohdistuvilla päästövähennystoimilla voidaan uusien kaasujen päästöjä pienentää 45–50 % Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vastaavasti 50–65 % vuoden 2020 tasossa. Alaraja on arvioitu saavutettavan pelkästään kylmäainevuotoja vähentävillä menetelmillä ja yläraja sekä vaihtoehtoisia kylmätekniikoita ja -aineita käyttämällä että vuotoja vähentämällä. Saavutettavalla päästövähennyksellä painotetut keskimääräiset päästövähennyskustannukset ovat vuotojen vähentämiseksi (alaraja) noin 80 mk/t CO₂-ekv. Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja noin 60 mk/t CO₂-ekv. vuonna 2020. Päästövähennyksen ylärajan saavuttamiseksi vastaavat vähennyksellä painotetut keskimääräiset päästövähennyskustannukset ovat noin 260 mk/t CO₂-ekv. KIOTO 1:n ja noin 180 mk/t CO₂-ekv. vuoden 2020 tasossa. Eri sovelluksissa päästöjen vähennystoimien kustannustehokkuus vaihtelee paljon. Halvimmaksi keinoksi osoittautui ajoneuvojen ilmastointi-

laitteiden tiivistäminen ja vastaavasti kalleimmaksi kodin kylmälaitteiden HFC-kylmäaineen korvaaminen isobutaanilla. Lisäksi on huomioitava, että eri toimilla saavutettavissa oleva päästöjen vähennyspotentialiaali vaihtelee myös runsaasti (ks. kohta 5.2, taulukko 33).

Kylmä- ja ilmastointilaitteisiin kohdistuvien toimien lisäksi päästöjä arvioitiin voitavan vähentää myös lisäämällä sähkölaitteiden SF₆-kaasun talteenottoa. Toimenpiteellä arvioitiin olevan uusien kaasujen päästöjä alle 2 % pienentävä vaikutus Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ja vuonna 2020. Talteenottokäytännön lisääminen osoittautui kuitenkin kaikkein halvimmaksi keinoksi vähentää uusien kaasujen päästöjä.

Sektorit, joille ei ole tunnistettu teknisiä päästövähennysmenetelmiä tai esitetty päästövähennyskenaarioita ja -kustannuksia, aiheuttavat tällä hetkellä arviolta 24 % Suomen uusien kaasujen päästöistä. Näiden sektoreiden merkitys kokonaisuuden kannalta on kuitenkin pienemässä ja niiden ennakoitaan muodostavan Kioton ensimmäisen velvoitekauden alun (2008) jälkeen noin 10 % Suomen yhteenlasketuista HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöistä. Tämän ryhmän lähteistä puolijohde- ja solumuoviteollisuuden kaasujen kulutuksen arvioidaan kuitenkin olevan selvässä kasvussa, joten ne saattavat tulevaisuudessa muodostua merkittäviksi päästölähteiksi.

Työssä laadittujen perus- ja vähennyskenaarioiden välinen ero on käytännössä monesti liukuva. Epävarmuutta skenaarioiden välille aiheuttavat lainsäädännön ja teknologisen muutoksen huomioiminen. Toisaalta arvion laatimishetkellä näköpiirissä olevat muutokset on perusteltua sisällyttää perusskenaarioon, toisaalta taas muutosten lopullista toteutumistapaa ei voi ennakoita tietää. Tässä työssä perusskenaarioihin on sisällytetty kummankintyyppisiä muutoksia, osan taas on katsottu sopivan paremmin vähennyskenaarioihin. Tietyt alat ovat laatineet ohjeistusta, jossa päästöjen vähentämiseen kiinnitetään huomiota. Tällaisia ohjeistuksia ja standardeja on laadittu esimerkiksi kylmälaitoksia ja SF₆-eristeisiä sähkölaitteita koskien. Kylmäaineisiin liittyviä ohjeistuksia ja lakeja kehitetään jatkuvasti, joten nykyinen tilanne saattaa muuttua hyvinkin nopeasti.

Kehityskulkujen toteutumisen lisäksi epävarmuuksia sisältyy myös käytettävissä olleisiin lähtötietoihin. Parhaat käytettävissä olevat arviot esimerkiksi päästökertoimista ovat usein asiantuntija-arvioita eivätkä ne perustu suoriin mittauksiin. Myös päästövähennyskeinojen kustannukset perustuvat kirjallisuudessa esitettyihin arvioihin, joita on muokattu suomalaisilta asiantuntijoilta saatujen tietojen perusteella. Sektorien ja sovellusten moninaisuudesta johtuen yksityiskohtaisempien ja vähemmän epävarmuuksia sisältävien päästöarvioiden laatiminen ei ollut tämän työn puitteissa mahdollista. Päästöarvioiden varmentaminen vaatisikin käytännön mittauksia.

8. Jatkotutkimustarpeet

HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä rikkiheksafluoridin kulutuskohteiden tuntemus Suomessa on sinällään jo varsin hyvällä tasolla. Ainoastaan tietyt todennäköisesti vähäisen merkityksen omaavat kulutuskohteet ovat yleisesti huonosti tunnettuja. Tällaisia ovat lähinnä puolustusvoimien ja lääketieteellisuuden erikoissovellukset (ks. taulukko 1). Jonkin verran epävarmuutta sisältyy myös tunnettujen käyttökohteiden kaasujen tämän hetken kulutusmääriin. Kaasujen tulevaan käyttöön vaikuttaa moni eri tekijä, joiden tunteminen tällä hetkellä on mahdotonta. Erityisen hankalaa kulutusennusteiden laatiminen oli sellaisissa kohteissa, joissa käytettävät tekniikat tai kaasut ovat tällä hetkellä jatkuvan muutoksen alaisuudessa. Varsinkin solumuovien ponneaineiden kehityskulkuun on saatavissa lisävarmuutta todennäköisesti vasta muutamien vuosien kuluttua. Lisäksi mahdollisia uusia käyttökohteita on hankala ennustaa.

Päästöarvioiden luotettavuuden kannalta kaasujen kulutuksen kehityssennusteita merkittävämpää olisi kuitenkin päästömäärien yksityiskohtaisemmalla mallintamismekanismeilla tuotettu päästötieto. Tämä edellyttäisi kaasujen kulutuskohteiden jaottelua entistä pienempiin ryhmiin siten, että erilaiset sovellukset ominaispiirteineen tulisivat paremmin esille. Tällöin kullekin sovellusryhmälle voitaisiin soveltaa ryhmälle tunnusomaisia päästömääräarvioita, jolloin luotettavuus kokonaisuuden kannalta paranisi oleellisesti. Sovellusten tunnusomaisten päästömäärien arvioinnin kannalta keskeistä olisi riittävien käytännön mittaustietojen saaminen.

Päästöjä aiheuttavan laite- tai tuotekannan vanhenemisen vaikutukset päästömäärin tulisi voida ottaa huomioon päästöjen kehitysarvioita laadittaessa. Käytännön mittaustietojen kerääminen vie kuitenkin aikaa oletettavasti niin kauan, että uusi laite- tai tuotekanta on ehtinyt vastaavassa ajassa kohdata useita teknisiä muutoksia, jotka aiheuttavat joka tapauksessa suhteellisen huomattavaa epävarmuutta arviointeihin. Mikäli vuosittain käyttöönotettava uusi laite- tai tuotekanta pysyy kuitenkin riittävän muuttumattomana, voitaisiin tämän tapaisilla tiedoilla arvioida kannan vanhenemisen vaikutuksia. Tällöin olisi mahdollista tuottaa arvioita myös siitä, kuinka kauan kyseistä laitetta tai tuotetta on ympäristön kannalta järkevää pitää käytössä.

HFC- ja PFC-yhdisteitä sekä rikkiheksafluoridia kuluttavien sovellusten yksityiskohtaisempi tuntemus olisi oleellista myös päästövähennystoimenpiteiden sovellettavuutta ajatellen. Tämän hetken tiedoilla suoritettavissa oleva sovellusjaottelu ei monissa kohdin ole riittävä, jotta päästövähennystoimenpiteiden sovellettavuutta voitaisiin luotettavasti arvioida. Etenkin käytössä olevan tekniikan tai kaasujen korvaamiseen liittyvät toimenpiteet kaipaavat yksityiskohtaisempia jatkotutkimuksia muun muassa mahdollisten välillisesti aiheutuvien haittojen selvittämiseksi riittävällä tarkkuudella. Välillisiä haittoja voivat olla muun muassa soveltuvuusongelmista

aiheutuvat turvallisuusriskit tai lisääntyneestä energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt. Myös toimenpiteiden aiheuttamat lisäkustannukset tarvitsevat tarkennuksia.

Työssä tuotettujen arvioiden perusteella päästöjen suurin vähennystarve ja -potentiaali on kaupan kylmälaitoksissa. Kylmäainepäästöjen mallintaminen käytännön mittaus-tietojen avulla yhdistettynä laitosten energiankulutustietoihin tuottaisi hyödyllistä aineistoa laitosten kokonaispäästöistä. Tällöin myös ilmastonmuutoksen torjunnan kannalta sopivimman päästövähennystoimen löytäminen kuhunkin sovellustyyppiin tulisi helpommaksi.

Lähdeluettelo

ABB, PreussenElektra Netz, RWE Energie, Siemens, Solvay Fluor und Derivate. 1999. Life Cycle Assessment "Electricity Supply Using SF6 Technology" (Summary Report). July 1999. 28 s.

Abbott, G. 2000. Esitelmä työpajassa: Joining European Efforts to Limit Emissions of HFCs, PFCs and SF6. Luxembourg 1.–2.2.2000. Kokousasiakirjat ovat monisteena.

Adato 2000. Kylmälaitteet: Valintaopas 2000. Adato Energia Oy. 23 s.

Ahokas, P. 2000. Finnglass Oy. Yksityinen tiedonanto. 17.11.2000.

Aittomäki, A. 2000. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Yksityinen tiedonanto. 8.12.2000.

Aittomäki, A. 2001. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Yksityinen tiedonanto. 6.3.2001.

Aittomäki, A., Alijoki, T., Eerikäinen, J., Hakala, P., Kaappola, E., Lahdenperä, H., Rauno, O., Seinelä, A. 1992. Kylmäteknikka. Kylmätuki Oy, Helsinki. 22 s. ISBN 951-96449-0-3

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V. 1996. Suurjännite-tekniikka. Otatieto 568, Espoo. 483 s. ISBN 951-672-226-1

Ashford, P. 1999. Emissions from Foams - Predicting, Monitoring, Reporting and Reducing. Teoksessa: Proceedings of the Joint IPCC / TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs. Petten, the Netherlands, 26-28 May 1999.

Aula, A., Kaappola, E., Eerikäinen, M., Timonen, L. 1999. Kaupan kylmälaitosten energiansäästö. Motivan julkaisu 3/1999. Motiva, Helsinki. 64 s. ISBN 952-5304-02-7

Baker, J. A. 1999. Mobile Air Conditioning: HFC-134a Emissions and Emission Reduction Strategies. Teoksessa: Proceedings of a Joint IPCC / TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs. Petten, the Netherlands, 26–28 May, 1999. S. 181–187.

Baker, J. A. 2000. Technical Options for Motor Vehicle Air Conditioning Systems. for Society of Automotive Engineers (SAE). U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), and Mobile Air Conditioning Society Worldwide (MACS). March 20, 2000. 13 s.

Bartos, S., Burton, S. 1999. PFC, HFC, and SF₆ Emissions from Semiconductor Manufacturing. Background paper prepared for the IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories. Washington. January 1999. 20 s.

Beu, L., Brown, P.T. 1999. Use and Emission Mitigation of PFC, HFC and SF₆ in the Semiconductor Industry. Presented at Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs. Petten, the Netherlands, 1999. 20 s.

Calm, J.M., Didion, D.A.. 1997. Trade-Offs in Refrigerant Selections: Past, Present and Future. Presented at Refrigerants for the 21st Century, ASHRAE/NIST Refrigerants Conference. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD. United States.

CEN 378/2000. EN 378-1, -2, -3, -4. Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements. Part 1–4. The European Committee for Standardization. 1999–2000. Yht. 122 s.

CIGRE 1991a. Handling of SF₆ and Its Decomposition Products in Gas Insulated Switchgear (GIS). Ist part. CIGRE WG 23.03. Published in Electra No. 136. Juni 1991.

CIGRE 1991b. Handling of SF₆ and Its Decomposition Products in Gas Insulated Switchgear (GIS). 2nd part. CIGRE Working Group 23.03. Published in Electra No. 137. August 1991.

CIGRE 1996. SF₆ and the Global Atmosphere. CIGRE Working Group 23.10, Task Force 01. Published in Electra No. 164. February 1996.

CIGRE 1997. SF₆ Recycling Guide*. Re-Use of SF₆ Gas in Electrical Power Equipment and Final Disposal. CIGRE Working Group 23.10, Task Force 01. Published in Electra No. 173. August 1997.

CIGRE 2000. Guide for SF₆ Gas Mixtures (Application and Handling in Electrical Power Equipment). CIGRE Working Group 23.02, Task Force 01. Technical Brochure No. 163. 50 s.

COM 1998. COM 603 Final. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Strategy for the phaseout of CFCs in metered dose inhalers. Brussels, 23.10.1998. 47 s. ISSN 0254-1475

Diessner, A., Finkel, M., Grund, A., Kynast, E. 1999. Dielectric Properties of N₂/SF₆ Mixtures for Use in GIS or GIL. 11th ISH London, paper 3.67. 1999. 4 s.

Elovaara, J. 2000. Fingrid Oyj. Yksityinen tiedonanto. 15.9.2000.

Elovaara, J., Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. korj. p. Otakustantamo 499. Otatieta Oy, Espoo. 487 s. ISBN 951-672-285-7

EPA 2000. Estimates of U.S. Emissions of High-Global Warming Potential Gases and the Costs of Reductions. Review Draft. March 2000 (Saatavissa: <URL: <http://www.epa.gov/ghginfo/reports.htm>>). 86 s.

EY 2037/2000. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EY) N:o 2037/2000. annettu 29. päivänä kesäkuuta 2000, otsonikerrosta heikentävistä aineista. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti (EYVL L 244) 29.9.2000. S. 1–24.

Finergy 2000. SÄHKÖMARKKINAT 2015, Sähkön käytön ja hankinnan kehitysnäkymiä. Energia-alan Keskusliitto ry Finergy. Tutkimusraportti nro 9, Helsinki. 64 s. ISBN 952-440-008-1

Ghodbane, M. 1999. On-vehicle Performance of a Secondary Loop System (Comparison to Current System). Delphi, Harrison Thermal Systems. Advanced Thermal Systems Group, USA. 13 s.

Hakala, P. 2001. Combicool Oy. Yksityinen tiedonanto. 27.03.2001.

Harjanne, R., Hyvönen, M. 1993. Rikkiheksafluoridi energialaitoksella: SF₆-kaasun ja sen hajoamistuotteiden käsittely ja terveysvaikutukset. Helsingin kaupungin energialaitos, Teknillinen tiedotus 1187-tu-92, Helsinki. 40 s. ISBN 951-772-327-X

Harnisch, J., Gluckman R. 2000. Interim Report on the European Climate Change Programme Working Group Industry Work Item Fluorinated Gases. Prepared on behalf of the European Commission by Jochen Harnisch (ECOFYS) & Ray Gluckman (Enviros). November 2000. 44 s.

Harnisch, J., Hendriks, C. 2000. Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe. Ecofys Energy and Environment, Germany. 70 s.

Harnisch, J., Stobbe, O., de Jager, D. 2001. Abatement of Emissions of Other Greenhouse Gases: "Engineered Chemicals". prepared for the IEA Greenhouse Gas R&D Programme by ECOFYS. Report Number PH3/35. February 2001. 81 s.

Heinonen, J., Heinonen, J., Salminen, M. 1999. Ammattikeittiöiden hyvän sisäilmaston suunnitteluohje. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. LVI-laboratorion raportti B61, Espoo. 57 s. ISBN 951-22-4501-9

Helynen, S., Holttinen, H., Lund, P., Sipilä, K., Wolff, J., Alakangas, E. 1999. Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman taustaraportti. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 24/1999. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Helsinki. 112 s.

Herold K., Radermacher R., Klein S. 1996. Absorption Chillers and Heat Pumps. CRC Press, USA. 286 s.

Hirvonen, R. 2000. VTT Energia. Yksityinen tiedonanto. 7.9.2000.

IEE 1998. Trends in Distribution Switchgear: 400 V-145kV for Utilities and Private Networks. Conference publication No. 459. 10–12 November 1998. S. 73–79, 139–160.

IIR 2000. International Institute of Refrigeration. Statement by Francois Billiard. presented at Sixth Session of the Conference of the Parties United Nations Framework Convention on Climate Change. The Hague 20.11.2000.

ILP-Tekniikka Oy 1999. Lämpöpumppu-uutiset 1/1999. ILP-Tekniikka Oy, Espoo. 4 s.

ILP-Tekniikka Oy 2000. Lämpöpumppu-uutiset 3/2000. ILP-Tekniikka Oy, Espoo. 8 s.

IPCC 1996. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Great Britain. 572 s. ISBN 0-521-56436-0

IPCC 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Technical Support Unit. September 2000 (Saatavissa: <URL:<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpgaum.htm>>).

IPCC 2001. Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. accepted in Accra 28.2.–3.3.2001.

IPCC/TEAP 1999. Meeting Report of the Joint IPCC/TEAP. Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, July 1999. 51 s.

Iso-Herttua, P., Riipinen, M. 2000. Helsingin Energia. Yksityinen tiedonanto. 27.11.2000.

Jeffs, M. 2000. Esitelmä työpajassa: Joining European Efforts to Limit Emissions of HFCs, PFCs and SF6. Luxembourg 2000. Kokousasiakirjat ovat olemassa monisteena.

Johnson, B., Haworth, E. 1999. HFCs as Blowing Agents for Domestic Refrigerator Insulating Foam. Teoksessa: Joint IPCC/TEAP Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs. Petten, the Netherlands, 26–28 May, 1999. 464 s.

Kaappola, E. 1989. Pienkylmälaitoksen käyttäjänopas. Kylmätuki, Helsinki. 65 s. ISBN 952-90-1404-X

Kaappola, E. 2001. Oy Danfoss Ab. Yksityinen tiedonanto. 6.3.2001.

Kaha Oy 2000. puhelinhaastattelu 13.10.2000.

Karvinen, T. 2001. Suomen Kylmätekniikka Oy. Yksityinen tiedonanto. 27.3.2001.

Kauppinen, T. 2000. Autojen Kylmälaite Oy. yksityinen tiedonanto. 25.9.2000.

Koljonen, T., Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. VTT Tiedotteita 1926. VTT, Espoo. 55 s. ISBN 951-38-5334-9

Krähling, H., Zipfel, L. 2000. LCA on HFC-365mfc and high performance rigid polyurethane foams. Solvay Fluor und Derivative GmbH. 10 s.

KTM 2000. Energiakatsaus 3/2000. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto, Helsinki. 37 s. ISSN 0356-9276

KTM 2001. Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet ja -mahdollisuudet Suomessa. Kansallisen ilmastostrategian taustaselvitys. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 4/2001, Helsinki. 169 s. ISBN 951-739-596-5

Lamberg, S., Lautkaski, R., Virolainen, K. 2000. Ammoniakkikäyttöisten kylmälaitteiden turvallisuusopas. VTT Automaatio, Tampere. 55 s. ISBN 952-91-2036-2

Lehtilä, A., Savolainen, I., Tuhkanen, S. 1997. Indicators of CO₂ emissions and energy efficiency: Comparison of Finland with other countries. VTT Publications 328. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 80 s. + liitt. 31 s.

Leskinen, S., Heikkinen, M. 2000. ABB Installaatiot Oy. Yksityinen tiedonanto. 19.10.2000.

Little, A. D. 1999. Global Comparative Analysis of HFC and Alternative Technologies for Refrigeration, Air Conditioning, Foam, Solvent, Aerosol Propellant, and Fire Protection Applications. Final Report to the Alliance for Responsible Atmospheric Policy, August 23, 1999. 142 s.

Maiss, M., Brenninkmeijer, C. A. M. 1998. Atmospheric SF₆: Trends, Sources, and Prospects. Environmental Science and Technology, vol. 32. pp. 3077-3086.

March 1998. Opportunities to Minimise Emissions of Hydrofluorocarbons (HFCs) from the European Union. Final Report. prepared by March Consulting Group. United Kingdom, September 1998. 121 s.

Motiva 2001. Motivan www-sivut. Ammattikeittiöiden energiatalous ja sisäilmasto. <URL: <http://www.motiva.fi/ammattikeittiot/index.html>>, [viitattu: 11.02.2001].

Mäkelä, K., Kanner, H., Laurikko, J. 1999. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 98 laskentajärjestelmä. Tutkimusraportti 504. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 41 s.

Niemeyer, L. 1998. A Systematic Search for Insulation Gases and Their Environmental Evaluation. presented at the 8th International Symposium on Gaseous Dielectrics, Virginia Beach 1998, Plenum, New York. ABB Research Center, Switzerland. S. 431–442.

Niemeyer, L. 2000. CIGRE Guide for SF₆ Gas Mixtures. Application and Handling in Electrical Power Equipment. presented at the Conference in the conference of US Environmental Protection Agency (EPA). 8 s.

NMR 1989. Nordisk Ministerråd. Användning av halon 1301 och 1211 som släckmedel i Norden. Brandtekniska Ingengörsbyrå AB, Köbenhavn. 65 s. ISBN 87-7303-338-3

Nydal, M. 1994. Käytännön kylmäteknikka. suomentanut Muuronen M.. Kylmätuki Oy 1994. 233 s. ISBN 951-96449-1-1

Oinonen, T. 2000. Sources, Emissions, and Potential Emission Reduction Options of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride in Finland. Finnish Environment Institute Chemicals Division. for the Finnish Ministry of the Environment. April 2000. 70 s.

Okmetic, 2001. Okmetic Oyj:n www-sivut. Products.
<URL: <http://www.okmetic.com/>>, [viitattu: 25.01.2001].

Olivier, J., Bakker, J. 1999. SF6 from Electrical Equipment and Other Uses. Background paper prepared for the IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories. Washington. January 1999. 17 s.

Orpana, M. 2000. Micro Analog Systems Oy. Yksityinen tiedonanto 28.11.2000.

Palmer, B. 1999. Sulphur Hexafluoride (SF6) Emissions from Magnesium. Background paper prepared for the IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories. Washington. January 1999. 17 s.

Pedersen, P. 1998. Substitutes for Potent Greenhouse Gases (HFCs, PFCs and SF6). Denmark: Danish Technological Institute, Energy. 80 s.

Pipatti, R. 1992. Kehitysarvioita eräiden halogenoitujen hiilivetyjen päästöistä Suomessa. VTT Tiedotteita 1409, Espoo. 58 s. ISBN 951-38-4303-3

Pullola, J. 2000. Suomen Muoviteollisuusliitto ry. Yksityinen tiedonanto. 16.10.2000.

Riikonen, M. 2000. Suomen Tasolasiyhdistys. Yksityinen tiedonanto. 7.12.2000.

Rossi, E., Hokkanen, J. 1990. Kylmälaitteiden CFC-jätteiden talteenotto ja käsittely. Ympäristöministeriö, Ympäristönsuojeluosasto selvitys 88, Valtion painatuskeskus, Helsinki. 56 s. ISBN 951-47-2130-6

Salminen, M., Resibacka, A., Ahonen, M., Kosonen, R. 1998. Ammattikeittiöiden energiatalous. Työtehoseura, TTS-Institute, Työtehoseuran julkaisuja 362, Helsinki. 55 s. ISBN 951-788-270-X

Salo, R. 2000. ABB Service Oy. Yksityinen tiedonanto. 08.12.2000.

Sand, J., Fischer, S. 1997. Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies. Oak Ridge National Laboratory. Tennessee, USA. 214 s.

Sandler, S. I. 1999. Chemical and Engineering Thermodynamics. Third Edition. University of Delaware, USA. 772 s. ISBN 0-471-18210-9

Sipilä, K. 2001. Kaukolämmitys ja jäähdytys (kohta 3.7.2). Teoksessa: Savolainen, I., Tuhkanen, S., Lehtilä, A. Teknologia ja kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittaminen. Taustatyö kansallista ilmasto-ohjelmaa varten. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 1/2001, Helsinki. 198 s. ISBN 951-739-585-X

SKLL, SKY 2000. KylmäExtra 2000. Kylmäalan julkaisu 1/2000. Suomen Kylmäliikkeiden liitto ry ja Suomen Kylmäyhdistys ry, 2000. 50 s.

Solvey 2001. Solvey Fluor und Derivate GmbH:n www-sivut. Product Under development, Solkane 365-mfc.

<URL: http://www.solvay.com/fluor/en/produkte/solkane/frame_365_mfc.html?365_mfc.html>, [viitattu 07.02.2001].

SULPU ry 2000. Suomen lämpöpumppuyhdistys: SULPU ry:n tiedote 30.11.2000 "Lämpöpumppujen myynti tuplaantuu vuosittain".

Sumantran, V., Fischer, S. 1999. An Assessment of Alternative Refrigerants for Automotive Applications based on Environmental Impact. 26 s.

Suomen Jääkiekkoliitto ry 2001. Suomen jääkiekkoliitto ry:n www-sivut. Jäähallit 6.7.1999. <URL: <http://www.finhockey.fi/10742>>, [viitattu: 11.02.2001].

SYKE 2000a. Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön kasvihuonekaasujen kansallista inventointia varten tekemä kysely kylmä- ja ilmastointilaitteita maahantuoville, asentaville ja huoltaville yrityksille.

SYKE 2000b. Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön kasvihuonekaasujen kansallista inventointia varten tekemä kysely autojen maahantuojille.

SYKE 2000c. Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön kasvihuonekaasujen kansallista inventointia varten tekemä kysely aerosoleja maahantuoville ja valmistaville yrityksille.

SYKE 2000d. Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön kasvihuonekaasujen kansallista inventointia varten tekemä kysely SF₆-eristeisiä sähkölaitteita käyttäville yrityksille.

SYKE 2000e. Suomen ympäristökeskuksen kemikaaliyksikön kasvihuonekaasujen kansallista inventointia varten tekemä kysely kemikaalien maahantuojille.

Tammela, V. 1990. Polymeeritiede ja muoviteknologia. Osa III. Otatieto 519. Helsinki: Otakustantamo. 431 s. ISBN 951-672-070-6

Tuhkanen, S., Pipatti, R. 1999. Uusiutuvien energialähteiden edistämishojelman ympäristövaikutusten arviointi. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 23/1999. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Helsinki. Oy Edita Ab. 83 s. ISBN 951-739-520-5

UNEP 1998a. Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, UNEP Ozone Secretariat. 80 s. ISBN 92-807-1728-6

UNEP 1998b. Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. United Nations Environment Programme. Ozone Secretariat. Nairobi. 285 s. ISBN 92-807-1731-6

UNEP 1999a. The Implications to the Montreal Protocol of the Inclusion of HFCs and PFCs in the Kyoto Protocol. UNEP Technology and Economic Assessment Panel. October 1999. 118 s. + liitt.

UNEP 1999b. 1998 Report of the Aerosols, Sterilants, Miscellaneous Uses and Carbon Tetrachloride Technical Options Committee. Ozone Secretariat, Nairobi. 98 s. ISBN 92-807-1726-X

Vakuutusyhtiöiden keskusliitto 2001. Vakuutusyhtiöiden keskusliiton www-sivut. Vahingontorjunta. Vahinkovakuutusyhtiöiden hyväksymät kaasusammutuslaitteisto-liikkeet, päivitetty 7.12.2000.

<URL: <http://www.vakes.fi/svk/suomi/svk23/svk23113f.htm>>, [viitattu: 24.01.2001].

van Gerwen, R. 2000. Emission Reduction of Non-CO2 Greenhouse Gases Used as Refrigerant. Teoksessa: Van Ham, J., Baede, A.P.M., Meyer, L.A., Ybema, R. Non-CO2 Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control and Implementation. Proceedings of the Second International Symposium. Kluwer Academ. Noordwijkerhout, The Netherlands, 8–10 September 1999. S. 485–490.

Vauhtispeed Oy 2001. Vauhtispeed OY:n www-sivut. Historia ja tuotekehittely. <URL: <http://www.vauhtispeed.fi/etusivu.html>>, [viitattu 28.02.2001].

VNp 891/1992. Valtioneuvoston päätös halonien käytön rajoittamisesta. N:o 891/92. 24.9.1992.

VNp 262/1998. Valtioneuvoston päätös otsonikerrosta heikentävistä aineista. N:o 262/98. 1.5.1998.

VNp 677/1993. Valtioneuvoston päätös täysin halogenoitujen kloorifluorihilivetyyhdisteiden, 1,1,1-trikloorietaanin sekä tetrakloorimetaanin käytön ja maahantuonnin rajoittamisesta. N:o 677/93. 8.7.1993.

Wheeler, I., Crooker, R., Wu, J., Alboy, A. 2000. Smooth Transition for the Appliance Industry Using Safe and Cost-Effective Gaseous Blowing Agents. Earth Technologies Forum, Washington D.C., 30.10.–1.11.2000. 6 s.

Wiksten, R. 1996. Lämpövoimaprocessit. Helsingin Teknillinen korkeakoulu, Otatiето 572, Espoo. 164 s. ISBN 951-672-230-X

Williams, D. 2000. HFC-245fa & HFC-245fa Blends – Blowing Agent Solutions for All Rigid and Integral Skin Foam Applications. Earth Technologies Forum, Washington D.C., 30.10.–1.11.2000.

Williams, D., Bogdan, M., Verbiest, P. 2000. HFC-245fa Sparay Polyurethane Foam Systems Co-Blown with Water: A Quality, Cost Effective, Safe Substitute for HCFC-141b. Paper presented at Polyurethanes EXPO '99. Honeywell, USA. 8 s.

Willis, R. 1999. Guidelines on Costing Environment Policies. DG Environment. 35 s. + liitt.

WMO 1999. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No 44. Geneva. ISBN 92-807-1722-7

Wright, P. 1999. Patient Care Issues in HFC Emission Policy. Astra. Pharmaceutical Sciences Department. England. paper presented at the Joint IPCC/TEAP Expert Group Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs. Petten, the Netherlands, 26–28 May, 1999. 464 s.

Ympäristöministeriö 1997. Finland's Second Report Under the Framework Convention on Climate Change. Helsinki, Yliopistopaino. 63 s.

Ympäristöministeriö 2000. Finland's Annual Inventory Report on Greenhouse Gases. to the European Union Monitoring Mechanism of Community CO₂ and Other Greenhouse Gas Emissions. Common Reporting Formats (CRF): 1990–1999. Ministry of the Environment.

Öko-Recherche 1996. Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriertes Verbindungen in Deutschland. A study commissioned by the German Environmental Protection Agency, Germany. 148 s.

Öko-Recherche 1999. Schwarz, W., Leisewitz, A. Emissions and Reduction Potentials of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride in Germany. Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH. Frankfurt am Main, Germany. 142 s. + 12 s.

Liite A: Halogenoitujen yhdisteiden ominaisuuksia

Taulukko A-1. Yleisimpien halogenoitujen yhdisteiden kemialliset kaavat, keskimääräiset eliniät ilmakehässä sekä GWP_{100} - ja ODP -kertoimet.

nimi	kemiallinen kaava	elinikä ilmakehässä [a]	GWP_{100}	ODP
Kloorifluorihiilivedyt (CFC-yhdisteet)				
CFC-11 (Trikloorifluorimetaani)	CCl_3F	50	3 800	1,0
CFC-12 (Dikloorifluorimetaani)	CCl_2F_2	102	8 100	1,0
CFC-113 (Triklooritrifluorietaani)	CCl_2FCClF_2	85	4 800	1,0
CFC-114 (Diklooritetrafluorietaani)	$CClF_2CClF_2$	300		1,0
CFC-115 (Klooripentafluorietaani)	C_2F_5Cl	1 700		0,6
Kloorifluorihiilivedyt (HCFC-yhdisteet)				
HCFC-22 (Klooridifluorimetaani)	CF_2HCl	12,1	1 500	0,055
HCFC-123	$C_2F_5HCl_2$	1,4	90	0,02
HCFC-124	C_2F_4HCl	6,1	470	0,022
HCFC-141b	$C_2FH_3Cl_2$	9,4	600	0,11
HCFC-142b	$C_2F_2H_3Cl$	18,4	1 800	0,065
Halonit				
Haloni-1211 (Bromidikloorimetaani)	$CBrClF_2$	20		3
Haloni-1301 (Bromitrifluorimetaani)	$CBrF_3$	65	5 400	10
Kloorifluorihiilivedyt (HFC-yhdisteet)				
HFC-23 (Trifluorimetaani)	CHF_3	264	11 700	-
HFC-32 (Difluorimetaani)	CH_2F_2	5,6	650	-
HFC-41 (Metyylifluoridi)	CH_3F	3,7	150	-
HFC-125 (Pentafluorietaani)	C_2HF_5	32,6	2 800	-
HFC-134	$C_2H_2F_4$	10,6	1 000	-
HFC-134a (1,1,1,2-tetrafluorietaani)	CH_2FCF_3	14,6	1 300	-
HFC-143	$C_2H_3F_3$	3,8	300	-
HFC-143a (1,1,2-trifluorietaani)	$C_2H_3F_3$	48,3	3 800	-
HFC-152a (1,1-difluorietaani)	$C_2H_4F_2$	1,5	140	-
HFC-227ea (1,1,1,2,3,3,3-heptafluorietaani)	C_3HF_7	36,5	2 900	-
HFC-236fa (1,1,1,3,3,3-heksafluoripropaani)	$C_3H_2F_6$	209	6 300	-
HFC-245ca	$C_3H_3F_5$	6,6	560	-
HFC-245fa (1,1,1,3,3-pentafluoripropaani)	$C_3H_3F_5$	* (7,7 ¹ -8,8 ²)	* (820 ² -1 040 ¹)	-
HFC-365-mfc (1,1,1,3,3-pentafluoributaani)	$C_4H_5F_5$	* (10,2 ³)	* (910) ³	-
HFC-43-10mee	$C_5H_2F_{10}$	17,1	1 300	-
Perfluorihiilivedyt (PFC-yhdisteet)				
Perfluorimetaani (PFC-14)	CF_4	50 000	6 500	-
Perfluorietaani (PFC-116)	C_2F_6	10 000	9 200	-
Perfluoripropaani (PFC-218)	C_3F_8	2 600	7 000	-
Perfluoributaani (PFC-31-10)	C_4F_{10}	2 600	7 000	-
Perfluoripentaani (PFC-41-12)	C_5F_{12}	4 100	7 500	-
Perfluorihexaani (PFC-614)	C_6F_{14}	3 200	7 400	-
Perfluorisyklobutaani (PFC-51-14)	$c-C_4F_8$	3 200	8 700	-
Perfluori-N-heptaani	C_7F_{16}	*	*	-
Perfluorioktaani	C_8F_{18}	*	*	-
Rikkiheksafluoridi	SF_6	3 200	23 900	-
Muut halogenoidut yhdisteet				
Typpitrifluoridi	NF_3	3 200		
HFE-7100 (Metoksyylinonafuoributaani)	$C_4F_9OCH_3$	* (740 ³)	* (10800 ³)	-
HFE-7200 (Etoksi-nonafuoributaani)	$C_4F_9OC_2H_5$	* (5,0 ³)	* (390 ³)	-
		* (0,77 ³)	* (55 ³)	-

* ei IPCC:n (1996) määrittelemä

¹ UNEP (1999a)

² Calm et al. (1997)

³ WMO (1999)

Lähde: IPCC (1996)

Liite B: Kylmäaineet

Kylmäaineiden numerointi

Kylmäaineiden numeroinnissa noudatetaan kansainvälisesti sovittua merkintätapaa. Kaikille kylmäaineille käytetään kirjainta R (= refrigerant), mutta niiden numerointi riippuu kemiallisesta koostumuksesta. CFC-, HCFC ja HFC-yhdisteiden numerotunnuksesta

1. numero on C-atomien lukumäärä -1
2. numero on H-atomien lukumäärä +1
3. numero on F-atomien lukumäärä.

Mikäli C-atomeita on vain yksi, jää ensimmäinen numero pois. Jos molekyyllissä on enemmän kuin yksi hiiliatomi, voi atomien sijainti vaihdella koostumuksen pysyessä muuttumattomana. Näitä niin sanottuja monomeerejä erotetaan toisistaan numerokoodin jälkeisellä kirjaimella (esim. R134a). Butaaneille (C_4H_{10}) on varattu luku 600 ja isomeereille tunnuskirjain a, b, tai c (isobutaani 600a). Epäorgaaniset kylmäaineet merkitään aina kolmenumeroisella luvulla, jossa ensimmäinen numero on 7 ja kaksi seuraavaa numeroa ovat kylmäaineen moolimassa pyöristettynä. Aseotrooppisille seoskylmäaineille on varattu 400-sarja ja seotrooppisille 500-sarja (ks. taulukko K1).

Taulukossa LK1 on yleisesti Suomessa käytössä olevien halogenoitujen kylmäaineiden sekä tunnettujen vaihtoehtoisten aineiden ominaisuuksia.

Taulukko B-1. Suomessa käytössä olevien halogenoitujen kylmäaineiden sekä tunnettujen vaihtoehtoisten aineiden ominaisuuksia.

Kylmäaine		Fysikaaliset tiedot						Turvallisuus-tiedot				Ympäristönsuojelliset tiedot			
N:ro	Nimi	Yhdisteiden massaosuudet [%]	Mooli-massa [g/mol]	Kiehumis-piste (NTP) ^{b)} [°C]	Kriittinen lämpötila [°C]	Kriittinen paine [MPa]	Atempi syttymisraja [%]	Palamis-lämpö [MJ/kg]	Elimikä ilmakehässä [a]	ODP	GWP ₁₀₀				
CFC- ja HCFC-kylmäaineet															
R-11	CFC-11	100	137,37	23,7	198,0	4,41	-	0,9		1,0	3800				
R-12	CFC-12	100	120,91	-29,8	112,0	4,14	-	-0,8		1,0	8100				
R-22	HCFC-22	100					-	2,2		0,055	1500				
R-502	CFC-115 / HCFC-22	51,2 / 48,8	111,63	-45,3	80,7	4,02	-			0,044	5494				
huoltokylmäaineet															
R-401A	HCFC-22/HFC-152a/HCFC-124	53 / 13 / 34	94,44	-34,4	105,3	4,61	-			0,039	970				
R-401B	HCFC-22/HFC-152a/HCFC-124	61 / 11 / 28	92,84	-35,7	103,5	4,68	-	-2,7		0,042	1060				
R-401C	HCFC-22/HFC-125a/HCFC-124	33 / 15 / 52	101,03	-30,5	109,9	4,40	-			0,034	760				
R-402A	HFC-125/HC-290/HCFC-22	60 / 2 / 38	101,55	-49,2	76,0	4,23	-	-1,4		0,020	2250				
R-402B	HFC-125/HC-290/HCFC-22	38 / 2 / 60	94,71	-47,2	83,0	4,53	-	-1,6		0,033	1960				
R-409A	HCFC-22/HCFC-124/HCFC-142b	60 / 25 / 15	97,43	-35,4	106,9	4,69	-	3,0		0,050	1440				
R-413A	HFC-134a/PFC-218/HC-600a	88 / 9 / 3					-			0,000	1774				
HFC-kylmäaineet															
R-23	HFC-23	100	70,01	-82,1	25,9	4,84	-	-12,5	243	0,000	11700				
R-134a	HFC-134a	100	102,03	-26,1	101,1	4,06	-	4,2	13,6	0,000	1300				
R-404A	HFC-125/HFC-143a/HFC-134a	44 / 52 / 4	97,60	-46,6	72,1	3,74	-	-6,6		0,000	3260				
R-407C	HFC-32/HFC-125/HFC-134a	23 / 25 / 52	86,20	-43,8	87,3	4,63	-	-4,9		0,000	1530				
R-408A	HFC-125/HFC-143a/HCFC-22	7 / 46 / 47	87,01	-45,5	83,3	4,42	-	5,7		0,026	2649				
R-410A	HFC-32/HFC-125	50 / 50	72,58	-51,6	72,5	4,95	-	-4,4		0,000	1725				
R-410B	HFC-32/HFC-125	45 / 55	75,57	-51,5	71,0	4,78	-			0,000	1830				
halogeenittomat kylmäaineet															
R-290	Propani – CH ₃ CH ₂ CH ₃	100	44,10	-42,1	96,7	4,25	2,3	50,3		0,000	*				
R-600a	Isobutaani – CH(CH ₃) ₂ -CH ₃	100	58,12	-11,6	134,7	3,64	1,8	49,4		0,000	*				
-	HC-600a / HC-290	50 / 50	50,15	-32,8	114,8	4,04	2			0,000	*				
-	HC-170 ^{b)} / HC-290	6 / 94	42,90	-50,0	91,2	4,29	1,9			0,000	*				
R-717	Ammoniakkii – NH ₃	100	17,03	-33,3	132,3	11,34	14,8	22,5		0,000	*				
R-718	Vesi – H ₂ O	100	18,02	100,0	374,2	22,10	-			0,000	*				
R-744	Huiliidioksidi – CO ₂	100	44,01	-78,4	31,1	7,38	-		50-200	0,000	1				

^{b)} HC-170 on etaani^{b)} ei määritelty

Lähteet: Fysikaaliset ja turvallisuus tiedot: (Calm et al. 1997)
Ympäristönsuojelliset tiedot: (IPCC 1996)

Liite C: Kodinkylmälaitteiden myynti Suomessa vuosina 1990–1998 ja arvioitu ennuste vuoteen 2010

Myyntilukuihin sisältyvät

- jääkaapit
- jääkaapit suurella vihanneslokerolla yms.
- jääkaapit pienellä pakastelokerolla
- jääkaappi-pakastinyhdistelmät
- pakastimet.

Taulukko C-1. Myyntitiedot (1990–1998) on kerätty Elektroniikan tukkukauppiat ry:ltä ja Kodintekniikkaliitto ry:ltä (Oinonen 2000).

vuosi	myynti yhteensä
1990	270 200
1991	231 500
1992	208 000
1993	192 000
1994	200 000
1995	222 400
1996	228 100
1997	247 000
1998	253 411
1999	254 000
2000	255 091
2001	256 182
2002	257 273
2003	258 364
2004	259 455
2005	260 545
2006	261 636
2007	262 727
2008	263 818
2009	264 909
2010	266 000

Lähde: (Oinonen 2000)

Liite D: Tyypillisen eurooppalaisen kodin jääkaapin päästötasearvioita tällä hetkellä markkinoilla oleville eriste- ja kylmäainevaihtoehdoille

Oletukset

Tarkastelussa oli tyypillinen eurooppalainen 230 litran jääkaappi pakastelokerolla, jonka toimintalämpötila on -18 °C . Laitteen kylmäaineena käytetään joko isobutaania tai vaihtoehtoisesti HFC-134a:ta, joiden oletetaan antavan yhtäläisen jäähdytystehon taulukossa D-1 ilmoitetuilla täytösmäärillä. Kompressorin energiahyötysuhteen oletettiin myös olevan yhtäläinen molemmilla kylmäainevaihtoehdoilla. Jääkaapin polyuretaanieristeen vaahdotusaineena oli joko syklopentaania tai vaihtoehtoisesti HFC-134a:ta. Eristeen tilavuuden oletettiin olevan vakio. Polyuretaanin tiheys ja massa sekä vaahdotusaineen massaosuus ja massa eristeessä esitetään taulukossa D-1. Laitteiden käyttöiäksi arvioidaan 15 a.

Perusoletuksena oli se, ettei laitteen käytöstäpoiston yhteydessä toteuteta eristeen punneaineen tai kylmäaineen talteenottoa. Herkkyystarkastelu suoritettiin kylmäainepäästöille siten, että laitteen käytöstäpoiston yhteydessä oletetaan saatavan 80 % alkuperäisestä kylmäaineesta talteen. Laitteen energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt arvioitiin käyttämällä sähköntuotannon keskimääräistä päästökerrointa (250 g CO₂/kWh) Suomessa (Lehtilä et al. 1997). Päästötaselaskelmien oletukset ja tulokset esitetään taulukossa D-1.

Tulokset

Taulukosta D-1 havaitaan, että kylmäaineen osuus laitteen käyttöiän aikana tapahtuvista kokonaispäästöistä on suurimmillaankin vain noin kymmenesosa. Kokonaispäästöistä 60–100 % aiheutuu laitteen kuluttaman sähköenergian tuotannosta. Syklopentaanilla vaahdotetun eristeen arvioitiin kasvattavan laitteen energiankulutusta noin 5 % HFC-134a:lla vaahdotettuun eristeeseen verrattuna. Tarkastelussa suurimmat kokonaispäästöt aiheutuivat kuitenkin vaihtoehdosta, jossa sekä kylmäaineena että eristeen punneaineena käytettiin HFC-134a:ta. Kylmäaineen talteenotolla ei todettu olevan vaikutusta eri vaihtoehtojen kokonaispäästöjen suuruusjärjestykseen. HFC-punneaineen talteenotolla laitteiden käytöstäpoiston yhteydessä olisi sen sijaan suuri vaikutus tällaisilla eristeillä

varustettujen järjestelmien päästöihin. Talteenoton tehokkuuden pitäisi kuitenkin olla erittäin korkea, jotta HFC-134a-ponneainetta käyttävän järjestelmän kokonaispäästötaso olisi yhtä alhainen kuin syklopentaanilla vaahdotetulla eristeellä varustetun järjestelmän. Laite, jonka eristeen ponneaineena ja kylmäaineena on käytetty hiilivetyjä, osoittautui tarkastelussa kokonaispäästöjen kannalta suotuisimmaksi.

Taulukko D-1. Tyypillisen eurooppalaisen kodin jääkaapin päästötasearvioita vaihtoehtoisille kylmä- (R-600a tai R-134a) ja eristeiden vaahdotusaineille (syklopentaani tai HFC-134a).

eristeen vaahdotusaine	kylmäaine: HC-600a (isobutaani)		kylmäaine: HFC-134a	
	syklopentaani	HFC-134a	syklopentaani	HFC-134a
eristevahto:				
- tilavuus (m ³)	0,1539	0,1539	0,1539	0,1539
- tiheys (kg/m ³)	37,5	37,8	37,5	37,8
- massa (kg)	5,771	5,817	5,771	5,817
vaahdotusaine:				
- massaosuus (%)	5,1	8,3	5,1	8,3
- massa (kg)	0,294	0,483	0,294	0,483
- GWP ₁₀₀	-	1300	-	1300
kylmäaine:				
- massa (kg)	0,045	0,045	0,127	0,127
- GWP ₁₀₀	-	-	1300	1300
suoravaikutus (kg CO ₂ -ekv.):				
- kylmäaine (ei talteenottoa)	4,1	627,7	165,1	792,8
- kylmäaine (80 %:n talteenotto)	0	0	165,1	165,1
- vaahdotusaine	0	0	33,0	33,0
	0	627,7	0	627,7
energian käyttö:				
- päivittäinen (kWh)	0,90	0,85	0,9	0,85
- vuosittainen (kWh)	328	312	328	312
laitteen käyttöikä (a)	15	15	15	15
keskim. sähköntuotannon CO ₂ -päästöt (kg/kWh)	0,25	0,25	0,25	0,25
epäsuoravaikutus (kg CO ₂ -ekv.)	1230	1170	1230	1170
kokonaispäästöt (kg CO₂-ekv.)	1230	1798	1395	1963
kylmäaineen talteenotto käytöstäpoistettaessa (80 %)	1230	1798	1263	1831

Lähteet: laitteen oletustiedot (Sand & Fischer 1997)
GWP₁₀₀-kertoimet (IPCC 1996)
sähköntuotannon päästöt (Lehtilä et al. 1997)

Liite E: Tyypillisen eurooppalaisen kaupan kylmälaitoksen päästötasearvioita erilaisille toteutusvaihtoehdoille

Oletukset

Tarkastelussa oli kaksi tyypillistä eurooppalaista kaupankylmälaitosta, joista toinen toimii pakastuslämpötiloilla 44 kW:n ja toinen kylmälämpötiloilla 132 kW:n kylmäteholla. Jäähdytys toteutetaan joko suoralla, välillisellä tai hajautetulla periaatteella. Kylmäaineena käytetään HFC-yhdisteitä tai välillisessä toteutuksessa vaihtoehtoisesti ammoniakkaa. Energiankulutuksen arvioitiin koostuvan kompressorin otto-, jäähdytys- ja lämmönsiirtoaineen pumppaus- sekä lauhduttimen tuuletusenergiantarpeesta. Laitosten energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt arvioitiin käyttämällä sähkön tuotannon keskimääräisenä päästökertoimena 500 g CO₂/kWh. Herkkyystarkastelu suoritettiin muuttamalla laitosten käytönaikaisten päästöjen kerrointa. Laitosten käyttöikäksi arvioitiin 15 a. Päästötaselaskelmien oletukset ja tulokset esitetään taulukossa E-1.

Tulokset

Tarkastelluissa esimerkeissä välillisellä tai hajautetulla toteutuksella päästiin lisääntyneestä energiankulutuksesta ja siitä aiheutuvista päästöistä huolimatta noin 30–50 %:n päästövähennyksiin vastaavaan suoraohyrystystoteutukseen verrattuna (taulukko E-1). Syy tähän on välillisessä ja hajautetussa järjestelmässä tarvittavan kylmäainemäärän merkittävä pieneneminen⁶² ja potentiaalisten vuotokohteiden oleellinen vähentyminen suoraohyrystysjärjestelmään verrattuna. Vertailtaessa välillistä R-404A ja ammoniakkitoteutusta keskenään havaitaan, että ammoniakkin paremmasta energiatehokkuudesta ja suorien kylmäainepäästöjen merkityksettömyydestä johtuen järjestelmällä päästään hieman alhaisempiin kokonaispäästöihin kuin vastaavalla R-404A-järjestelmällä (taulukko E-1). Erot välillisen ja hajautetun järjestelmän kokonaispäästöissä ovat maksimissaan 10–15 % riippumatta tarkastelluista päästöjen hallinnantasoista. Parantamalla suoraohyrystysjärjestelmän tiiviyyttä ja huoltokäytäntöjä voidaan kylmäainepäästöjä vähentää oleellisesti. Tarkastellussa esimerkissä menetelmällä saavutettiin noin 30–40 %:n alenema kokonaispäästöissä. Tällöin jäähdytyksen

⁶² Suomessa kylmäainetäytöksen pienentäminen taulukossa E-1 esitetyle tasolle vaatii myös välillisen lauhdutuksen, joka lisää pumppausenergian tarvetta ja huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta.

välillisellä tai hajautetulla toteutuksella saavutettava päästövähennys oli suhteessa selvästi alhaisempi kuin referenssitilanteessa (nykyinen käytäntö).

Taulukko E-1. Tyypillisten eurooppalaisten kaupan kylmälaitosten (kylmä ja pakastus) päästötaselaskelmien oletukset ja tulokset erilaisilla toteutuksilla ja kylmäaineilla.

jäähdytysjärjestelmä	pakastuslämpötilat				kylmälämpötilat			
	suora	välillinen		hajaut.	suora	välillinen		hajaut.
höyrystin ⁶³	-32 °C	-35 °C	-35 °C	?	-7 °C	-10 °C	-10 °C	?
kylmäaine	R-404A	R-404A	R-717	R-404A	R-134a ⁶⁴	R-134a	R-717	R-134a
kompressorit:								
- teho kW	44	44	44	44	132	132	132	132
- huipunkäyttöaika (%)	40	40	40	40	40	40	40	40
- jäähdytyksen jakelu (MWh/a)	154	154	154	154	462	462	462	462
- pumppausenergia (MWh/a) ⁶⁵	0	6	6	3	0	17	17	9
- kokonaisjäähdytysteho (MWh/a)	154	160	160	157	462	479	479	471
- COP ⁶⁶	1,76	1,60	1,64	1,69	3,32	3,02	3,21	3,12
- kompressorin ottoteho (MWh/a)	87	100	98	93	139	159	150	151
lauhdutin:								
- poistettava lämpö (MWh/a)	241	266	264	252	601	656	646	630
- tarvittava tuuletusteho (MWh/a) ⁶⁷	4	5	5	5	11	12	12	12
kokonaisenergian käyttö:								
- vuosittainen (MWh/a)	92	111	109	100	150	188	179	171
- elinaikainen (MWh)	1377	1661	1629	1503	2187	2822	2681	2493
epäsuoravaikutus (t CO₂-ekv.)	690	830	815	750	1090	1411	1340	1250
kylmäainepäästöt:								
- GWP ₁₀₀	3260	3260	0	3260	1300	1300	0	1300
- kylmäainetäytös (kg)	162	18	9	40	234	26	11	58
- a) nykyinen käytäntö								
- päästökerroin (%/a)	13,5	4	4	5	13,5	4	4	5
- päästöt (kg)	328	11	5	30	473	15	7	44
- b) parannettu päästöjen hallinta								
- päästökerroin (%/a)	6	2	2	2	6	2	2	2
- päästöt (kg)	145	5	3	12	210	8	3	18
suoravaikutus								
a) nykyinen käytäntö (t CO ₂ -ekv.)	1067	35	0	99	615	20	0	57
b) parannettu hallinta (t CO ₂ -ekv.)	474	17	0	40	273	10	0	23
kokonaisvaikutus								
a) nykyinen käytäntö (t CO ₂ -ekv.)	1760	870	815	850	1720	1430	1340	1300
b) parannettu hallinta (t CO ₂ -ekv.)	1160	850	815	790	1370	1420	1340	1270

Lähteet: laitoksien oletustiedot (Sand & Fischer 1997)
GWP₁₀₀-kertoimet (IPCC 1996)

⁶³ Suomessa kylmäkalusteiden rakenteen ja tiukentuneiden lämpötilavaatimusten vuoksi höyrystymislämpötilat ovat esitettyjä alemmat.

⁶⁴ Suomessa sekä pakkas- että kylmäpuolella käytetään kylmäaineena nykyään R-404:ta (Kaappola 2001).

⁶⁵ Pumppausenergian tarve suurenee ja järjestelmän hyötysuhde huononee, mikäli käytetään välillistä lauhdutusta.

⁶⁶ Koska Suomessa höyrystymislämpötilat ovat esitettyjä alhaisemmat ja lauhtumislämpötila puolestaan välillisestä lauhtuksesta johtuen korkeampi, ovat myös COP-arvot noin 25–30 % esitettyjä alhaisemmat (Karvinen 2001).

⁶⁷ Tarvittava tuuletusteho on välillistä lauhdutusta käytettäessä suurempi kuin esitetty arvot.

Liite F: Uusien ajoneuvojen rekisteröinti ja ilmastointilaitteiden osuus Suomessa vuosina 1990–1999 ja ennusteet vuoteen 2020

*Taulukko F-1. Uusien henkilö-, paketti-, linja- ja kuorma-autojen rekisteröinti ja
ilmastointilaitteiden osuus Suomessa vuosina 1990–1999 sekä ennusteet vuoteen 2020.*

vuosi	henkilö- ja pakettiautot		linja-autot		kuorma-autot	
	autot	ilmastointi- laite/auto	autot	ilmastointi- laite/auto	autot	ilmastointi- laite/auto
1990	139 742	0	453	0	4 194	0
1991	92 979	0	343	0	2 188	0
1992	68 891	0	201	0	1 230	0
1993	56 003	0	191	0	921	0
1994	67 434	0	203	0	2 118	0
1995	80 145	0,0424	315	0,3000	3 576	0,5867
1996	96 163	0,0789	456	0,3250	3 741	0,6463
1997	104 963	0,1372	466	0,3500	4 311	0,6416
1998	126 386	0,2165	520	0,4000	4 984	0,6744
1999	150 536	0,3034	450	0,4100	4 700	0,7364
2000	150 834	0,3785	450	0,4200	4 880	0,7563
2001	151 132	0,4315	450	0,4300	5 030	0,7701
2002	151 430	0,4635	450	0,4400	5 180	0,7797
2003	151 728	0,4813	450	0,4500	5 180	0,7863
2004	152 026	0,4905	450	0,4600	5 180	0,7908
2005	152 324	0,4953	450	0,4700	5 180	0,7938
2006	152 622	0,4976	450	0,4800	5 180	0,7958
2007	152 920	0,4988	450	0,4900	5 180	0,7972
2008	153 218	0,4994	450	0,5000	5 180	0,7981
2009	153 516	0,4997	450	0,5000	5 180	0,7987
2010	153 814	0,4999	450	0,5000	5 180	0,7992
2011	154 112	0,4999	450	0,5000	5 180	0,7992
2012	154 410	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2013	154 708	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2014	155 006	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2015	155 304	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2016	155 602	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2017	155 900	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2018	156 198	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2019	156 496	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992
2020	156 794	0,5000	450	0,5000	5 180	0,7992

Lähteet: Uusien ajoneuvojen rekisteröinti 1990–2015: (Mäkelä et al. 1999)
Ilmastointilaitteiden osuudet (Oinonen 2000)

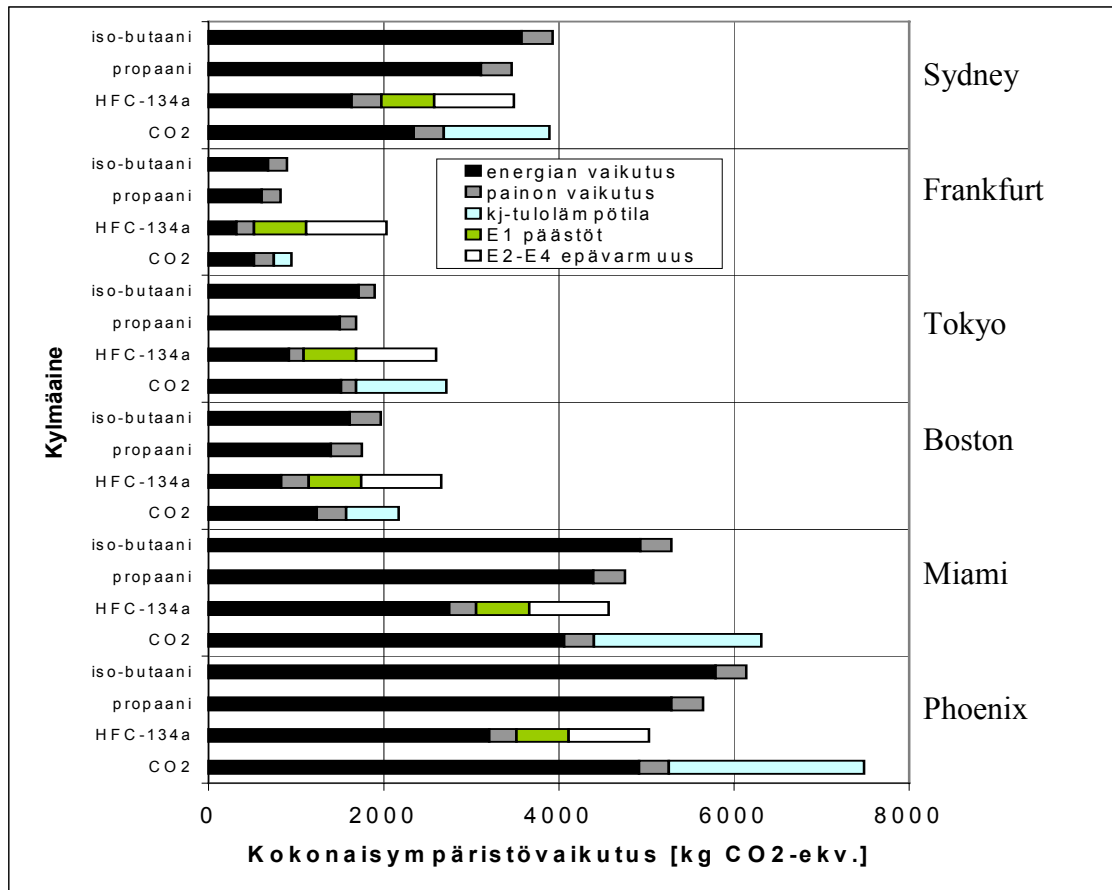
Liite G: Keskikokoisen henkilöauton ilmastointilaitteen päästötasearvioita erilaisissa ilmastollisissa olosuhteissa

Oletukset

Tarkastelussa oli erityyppisillä lähitulevaisuudessa odotettavissa olevilla ilmastointilaitteilla varustettu keskikokoinen henkilöauto (3,8 litran V6-moottori). Ilmastointilaitteena käytettiin joko nykytilanteesta parannettua HFC-134a-kylmäaineella toimivaa suoraohyrystysjärjestelmää, hiilivetykäyttöistä (isobutaani tai propaani) välillistä tai ylikriittistä hiilidioksidijärjestelmää. HFC-134a-järjestelmän kylmäainetäytös on 0,964 kg. Jokaisella laitevaihtoehdolla on oletettu saavutettavan yhtäläinen jäähdysteho, tosin vaihtelevilla energiahyötysuhteilla. Päästöjen herkkyyksiä tarkasteltiin vaihtelemalla parannetun HFC-134a-järjestelmän tiiviyydestä ja huoltokäytännöistä riippuvaa käytön päästökerrointa (4–10 %/a). Myös ylikriittisen hiilidioksidijärjestelmän kaasujäähdyttimelle tulevan ilman lämpötilaa käytettiin muuttujana. Tarkastelut suoritettiin kuudessa eri kaupungissa, joiden ilmastolliset olosuhteet (ilman kosteus ja lämpötila) poikkeavat toisistaan verrattain runsaasti. Ajoneuvoa oletettiin käytettävän jokaiselle tarkastelutapaukselle tyypillisten ajojaksojen mukaisesti. Ilmastointilaitteen käyttöiksi arvioitiin 11 vuotta. Päästövertailun tulokset esitetään kuvassa G-1.

Tulokset

Kuvasta G-1 havaitaan, että ilmastointilaitteen energiankulutuksen ja painon vaikutuksesta aiheutuvat pakokaasupäästöt muodostavat merkittävän osan laitteiden kokonaispäästöistä kaikissa tarkastelutapauksissa. Parannettu HFC-134a-järjestelmä aiheutti vaihtoehtoista vähiten päästöjä erityisesti kuumissa ja kosteissa ilmastoissa (vrt. Phoenix ja Miami). Kylmimmissä ilmastoissa (vrt. Frankfurt, Tokyo, Boston) hiilivetykäyttöiset välilliset järjestelmät aiheuttivat lähes yhtäläisen tai pienemmän määrän päästöjä kuin parannettu HFC-134a-järjestelmä. Ylikriittisen hiilidioksidijärjestelmän tehokkuus ja siten myös päästöt riippuivat suhteellisen paljon kaasujäähdyttimelle tulevan ilman lämpötilasta. CO₂-järjestelmä osoittautui parannettua HFC-134a-laitteistoa vähäpäästöisemmäksi ainoastaan Frankfurtin tapauksessa.



Kuva G-1. Keskikokoisen henkilöauton ilmastointilaitteen (välillinen isobutaani- tai propaanijärjestelmä, parannettu HFC-134a-järjestelmä, ylikriittinen CO₂-järjestelmä) kokonaispäästötaseita erilaisissa ilmastollisissa olosuhteissa. Parametrit: laitteen energiankulutuksesta ja painon vaikutuksesta aiheutuvat pakokaasupäästöt, ilman tulolämpötila CO₂-järjestelmän kaasujäähdyttimelle, HFC-134a-järjestelmän käytön aikaiset vuodot (E1 = 4 %/a, E2-E4 = 6–10 %/a).

Lähde: (Sumantran & Fischer 2000)

Liite H: Solumuovit

Taulukko H-1. CFC-yhdisteille vaihtoehtoiset ponneaineet ja tekniikat sovelluskohteittain (UNEP 1998)

vaahtotyyppi	CFC-yhdisteille vaihtoehtoiset ponneaineet			
	HCFC-yhdisteet	HFC-yhdisteet		muut vaihtoehdot
		kaupalliset	ei-kaupalliset	
kova polyuretaani kodin kylmälaitteet muut sovellukset levyihio (joustava laminointi) sandwich-elementti ruiskutettava PUR levyihio putkieriste saumaeriste	141b, 142b/22 141b, 22, 22/142b 141b, 141b/22 141b, 22, 22/142b 141b 141b 141b 22	134a 134a 134a 134a, 152a/ dimetyylieetteri/ propaani/butaani	245fa, 365mfc 245fa, 365mfc 245fa, 365mfc 245fa, 365mfc 245fa, 365mfc 245fa, 365mfc 245fa, 365mfc	CO ₂ (vesi), HC:t HC:t HC:t CO ₂ (vesi) HC:t CO ₂ (vesi), syklopentaani
joustava polyuretaani levyihio, boxfoam muottiin valettu	eivät tarpeellisia eivät tarpeellisia			CO ₂ , metyleenikloridi, asetoni, AB-tekniikka, pentaani, CO ₂ (LCD), pitkäketjuiset polyolit, lisäaineet, nopeutettu jäähdytys, muuttuva paine pitkäketjuiset polyolit, CO ₂ (vesi, LCD, GCD)
puolikova polyuretaani integraalivaahto sekalaiset	141b, 142b/22 141b, 22/CO ₂	134a, 152a	245fa, 365mfc	CO ₂ (vesi), HC:t CO ₂ (vesi)
fenolit	141b		245fa, 365mfc	HC:t, 2-klooripropaani
suulakepuristettu polystyreeni lamelli levyihio	eivät tarpeellisia 22, 142b	134a, 152a 134a, 152a		CO ₂ (LCD), HC:t, ilmakehän kaasut CO ₂ (LCD)
polyolefiini	22, 142b	152a	134	CO ₂ (LCD), HC:t

Taulukko H-2. Kovan polyuretaanin vaihtoehtoiset ponneaineet ja niiden ominaisuuksia (Jeffs 2000)

	kiehumispiste (°C)	vaahdotusaineen lämmönjohtavuus (mW/mK)	mittauslämpötila (°C)	GWP ₁₀₀
CO ₂ (vesivaahto)	-78	14,5	10	1
HC:t	28–50	11–14	10	*
HFC-134a	-27	12,4	10	1300
HFC-245fa	15,3	14	40	(820)*
HFC-365mfc	40,2	9	24	(910)*

* ei IPCC:n (1996) määrittelemä

Taulukko H-3. Tunnusomaisia lämmönjohtavuuksia erityyppisille eristeille.

eriste	lämmönjohtavuus (mW/mK)
PU-solumuovi	15–30
EPS-solumuovi	40
villa	60–65

Taulukko H-4. Eri ponneaineilla valmistettujen XPS-solumuovien lämmönjohtavuuksia (Abbott 2000)

vaahdotusaine	lämmönjohtavuus (mW/mK)		
	paksuus: d < 60 mm	paksuus: 60 < d < 120 mm	paksuus: d > 120 mm
CO ₂ (nestemäinen)	32–33	33–37	37–42
HFC-152a	31–33	32–36	36–40
HFC-134a	27–28	28–30	30–32

Liite I: Sähkölaitteiden vaihtoehtoisia eristyskaasuja

Taulukko I-1. Eri kaasujen oleellisia ominaisuuksia sähköisen eristämisen tai virran katkaisun kannalta (Niemeyer 1998)

Kaasu	kaava	GWP ₁₀₀ (IPCC 1996)	kiehumis- piste [°C]	äänen- nopeus [m/s]	sähköljuuus [suht. SF ₆]	stabiilius valokaareissa	terminen katkaisukyky [suht. SF ₆]	johtavat hajoamis- tuotteet
rikkiheksafluoridi	SF ₆	23 900	-51	140	1	kyllä	1	-
	CF ₃ SF ₅	1) 6 500	-24,5	115	1,3	ei		-
PFC-yhdisteet	CF ₄	6 500	-128	168	0,41	kyllä	0,6 ³⁾	hiili
	C ₂ F ₆	9 200	-78	156	0,8	ei	0,45 ³⁾	
	C ₃ F ₈	7 000	-38	124	0,94	ei		
PFE-yhdisteet	C ₂ OF ₆	2) 1 300	-59	137	0,86	ei		
HFC-yhdisteet	C ₂ F ₄ H ₂ (134a)	1 300	-27	168	0,46	ei		
	C ₂ F ₃ H ₃ (143)	300	-111	185	0,47	ei		
jalokaasut	He	-	-269	980	0,02	kyllä	0,033 ³⁾	metalleja
	Ar	-	-168	308	0,07	kyllä	0,007 ³⁾	metalleja
hiilivedyt	CH ₄	21	-164	418	0,47	kyllä	60 ⁴⁾	metalleja
muut fluorittomat	H ₂	-	-253	1200	0,18	kyllä	120 ⁴⁾	metalleja
	N ₂	-	-196	336	0,30	kyllä	0,02 ³⁾	metalleja
	ilma	-		330	0,33	kyllä	0,04 ³⁾	metalleja
	CO ₂	1	-78	254	0,3	kyllä	0,11 ³⁾	metalleja

¹⁾ IPCC (IPCC 1996) ei ole määritellyt GWP₁₀₀-kerrointa. Niemeyer 1998 ilmoittaa sen olevan suurempi kuin SF₆:n GWP₁₀₀-kerroin

²⁾ IPCC (IPCC 1996) ei ole määritellyt GWP₁₀₀-kerrointa

³⁾ palaavan transienttijännitteen raja: 24 kA_{RMS} / 60 Hz , paine 2 MPa

⁴⁾ 50 kA / 60 Hz / 3,8 MPa

⁵⁾ mikäli käytetään hiilikoskettimia

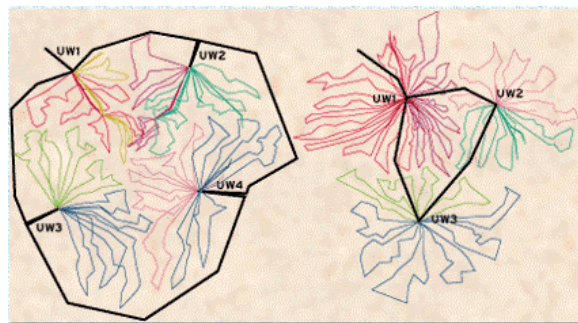
Lähde: (Niemeyer 1998)

Liite J: Elinkaarianalyysivertailu kaupunkisähkön jakelun toteuttamisesta GIS- tai AIS-laitoksilla

Oletukset

Tarkastelussa oli hypoteettinen tilanne saksalaisesta kaupungista (koko on noin 40 km² ja asukasluku 130 000), jonka sähkönjakelu toteutetaan kahdella eri vaihtoehdolla. Kaupungin sähkönkulutuksen huippukuorma on 120 MW ja kulutus tarkastelun ensimmäisenä vuotena on 400 GWh. Sähkönkulutuksen arvioidaan kasvavan 30 vuoden tarkastelujakson aikana 1,5 % vuodessa.

Sähkön syöttö tapahtuu joko neljästä esikaupunkialueelle sijoitetusta 110/20 kV:n avomuuntoasemasta (AIS) tai kolmesta kulutuksen läheisyyteen sijoitetusta SF₆-eristeisestä 110/20 kV:n muuntoasemasta (GIS). AIS-toteutuksessa sähkön jakelu tapahtuu 20 kV:n jakeluverkolla. Muuntoasemat on yhdistetty kaupungin ulkopuolella kulkevilla 110 kV:n ilmajohdoilla (kuva J-1, vasen). GIS-toteutuksessa sähkön jakelu tapahtuu myös 20 kV:n jakeluverkolla ja muuntoasemat on yhdistetty toisiinsa 110 kV:n kaapelilla (kuva J-1, oikea). Vuotuisiksi SF₆-päästöiksi on arvioitu alle 1 %.

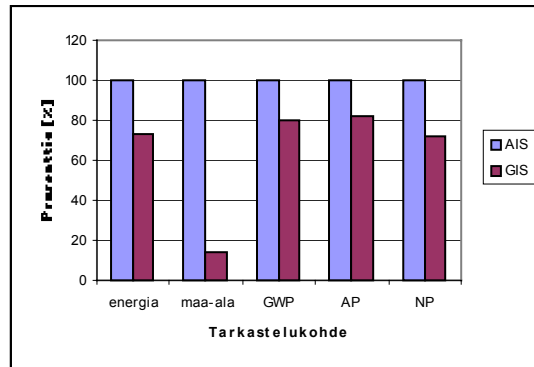


Kuva J-1. Sähkön jakelun toteuttaminen AIS- (vasen) ja GIS-laitoksilla (oikea). Paksut viivat kuvaavat 110 kV:n siirtojohtoja ja kaapeleita, ohuemmat viivat 20 kV:n kaapeleita.

Molemmissa toteutuksissa 110 kV:n jännite tulee 110/20 kV:n muuntoasemille 380/110 kV:n muuntoasemista. Lisäksi järjestelmien suunnittelussa on huomioitu erityyppisten laitteiden viat siten, että sähkön jakelun laatu on yhtäläinen. Tarkasteltujen järjestelmien primäärienergian käytössä on huomioitu tarvittavien asemien ja laitteiden rakentamisen energian tarve sekä käytön aikana tapahtuvat häviöt.

Tulokset

Elinkaarianalyysit toteutettiin DIN EN ISO 14040-standardin mukaisesti ja vertailun tulokset esitetään kuvassa J-2.

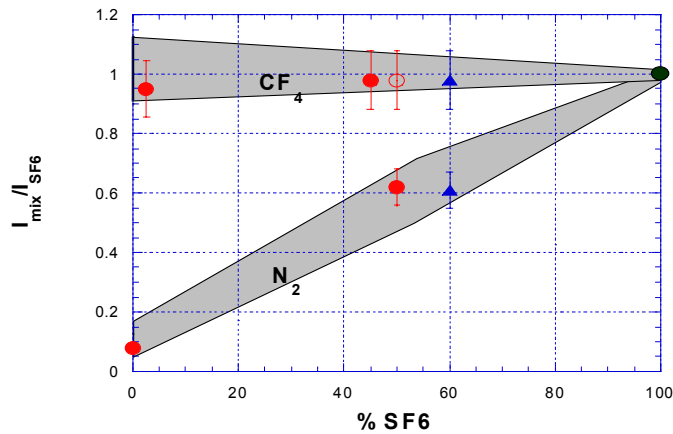


Kuva J-2. Elinkaarianalyysin GIS-toteutuksen suhteellinen primäärienergian ja maa-alan käyttö sekä vaikutus kasvihuoneilmiöön (GWP = global warming potential), happamoitumiseen (AP = acidification potential) ja rehevöitymiseen (NP = nutrition potential) verrattuna AIS-toteutukseen.

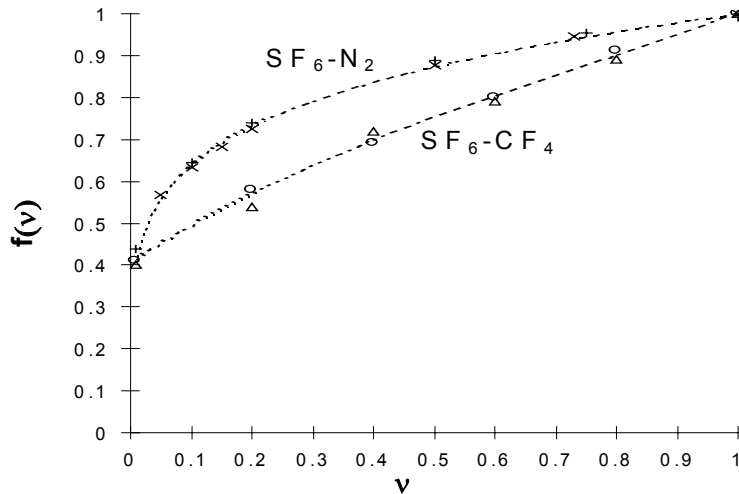
Kuvassa J-2 esitettävät tulokset puoltavat GIS-laitosten käyttöä niin primäärienergian kulutuksen ja maa-alan tarpeen kuin ympäristövaikutustenkin kannalta tarkastelussa esitetyssä tilanteessa. SF₆-päästöt muodostavat GIS-toteutuksen hiilidioksidiekvivalenteiksi muutetuista kasvihuonekaasupäästöistä ainoastaan noin 6–9 %. SF₆-päästöjen pitäisi siten olla noin nelinkertaiset (<4 %) nykyisiin (<1 %) verrattuna, jotta AIS-toteutuksella saavutettaisiin etu kasvihuonekaasupäästöissä.

Lähde: (ABB et al. 1999)

Liite K: Seoskaasujen sähkölujuus ja katkaisukyky



Kuva K-1. Normalisoitu oikosulkuvian katkaisukyky $\text{SF}_6\text{-CF}_4$ - ja $\text{SF}_6\text{-N}_2$ -seoskaasuilla SF_6 -kaasun tilavuusosuuden funktiona (Niemeyer 2000).



Kuva K-2. Normalisoitu sähkölujuus $\text{SF}_6\text{-CF}_4$ - ja $\text{SF}_6\text{-N}_2$ -seoskaasuilla SF_6 -kaasun tilavuusosuuden funktiona (CIGRE 2000).



Tekijä(t) Oinonen, Teemu & Soimakallio, Sampo			
Nimeke HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa			
Tiivistelmä Uusien kasvihuonekaasujen, HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä rikkiheksafluoridin (SF ₆), päästöjen ennakoitaan kasvavan maailmanlaajuisesti seuraavien vuosikymmenien aikana. Päästöjen lähteissä, määrissä ja kehitysnusteissa on eri maiden välillä huomattavia eroja, jotka riippuvat pääasiassa maiden teollisuuden rakenteesta ja otsonia heikentävien yhdisteiden käytön korvautumisesta HFC- ja PFC-yhdisteillä. Tässä selvityksessä tarkastellaan Suomen uusien kasvihuonekaasujen päästöjen kehittymistä lähitulevaisuudessa sekä siitä johtuvaa päästöjen vähennystarvetta. Päästöjen vähennysmenetelminä tarkasteltiin erilaisten teknisten toimenpiteiden soveltuvuutta sekä niiden avulla saavutettavaa päästövähennyspotentiaalia ja toimenpiteistä aiheutuvia kustannuksia. Suomessa uusien kasvihuonekaasujen päästöt ovat tällä hetkellä noin 0,5 Mt CO ₂ -ekvivalenttia. Päästöjen arvioitiin kasvavan noin nelinkertaisiksi vuoteen 2010 ja noin viisinkertaisiksi vuoteen 2020 mennessä, jolloin niiden osuus kaikkien Kioton pöytäkirjan alaisten kasvihuonekaasujen päästöistä olisi paljon nykyistä suurempi. Suomessa päästöjen ennakoituun kasvuun vaikuttaa merkittävimmin otsonia heikentävien kylmäaineiden käytön korvautuminen pääasiassa HFC-yhdisteistä koostuvilla kylmäaineilla, joiden päästöjen arvioitiin muodostavan lähes 90 % yhteenlasketuista uusien kaasujen päästöistä kuluvan vuosituhanen toisella vuosikymmenellä. Päästövähennystoimenpiteiden soveltaminen käytössä olevaan laitekantaan on yleensä tehottomampaa ja ongelmallisempaa kuin sovellettaessa vastaavanlaisia toimia uuteen laitekantaan. Tästä syystä päästöjen vähennyspotentiaali on osittain sidoksissa toimien käyttöönottoaikatauluun. Tässä selvityksessä toimenpiteiden käyttöönotto ajoitettiin pääsääntöisesti vuoden 2002 alkuun ja toimenpiteinä arvioitiin kahta erityyppistä teknistä menetelmää, joista toinen liittyy käytettävän tekniikan tai päästöjä aiheuttavien yhdisteiden korvaamiseen ja toinen kaasuvuotojen vähentämiseen. HFC-kylmäaineiden tarvetta vähentävien teknisten ratkaisujen toteuttaminen osoittautui selvästi kalliimmaksi vaihtoehdoksi kuin vuotojen vähentäminen, jolle päästövähennyksellä painotettujen keskimääräisten arvioitiin olevan noin 80 mk/t CO ₂ -ekv. Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella (2008–2012) ja noin 60 mk/t CO ₂ -ekv. vuonna 2020. Vaihtoehtoisilla tekniikoilla ja aineilla arvioitiin saavutettavan suurempia päästövähennyksiä kuin vuotoja vähentämällä, mutta niiden soveltuvuus on myös selvästi rajoitetumpi. Yhteenlaskettuna eri toimilla saavutettavat päästövähennykset arvioitiin Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella noin 50 %:ksi ja vuonna 2020 noin 50–65 %:ksi uusien kaasujen päästöistä.			
Avainsanat greenhouse gases, emissions, abatement, Finland, organic halogen compounds, hydrocarbons, sulfur fluorides, technology, economy, refrigerating equipment			
Toimintayksikkö VTT Energia, Energiajärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5839-1 (nid.) 951-38-5900-1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero N0SU00330	
Julkaisu-aika Heinäkuu 2001	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 154 s. + liitt. 17 s.	Hinta B
Projektin nimi		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Author(s) Oinonen, Teemu & Soimakallio, Sampo			
Title Technical and economic evaluation of emission abatement options of HFCs, PFCs and SF₆ The case of Finland			
Abstract <p>Emissions of the so called new greenhouse gases – HFCs, PFCs and SF₆ – are expected to grow globally in the near future. Sources, magnitudes and projections of future emissions differ significantly between countries, mainly due to structural differences between countries' industries, as well as the rate and phase of the substitution of ozone depleting substances by HFCs and PFCs. This study focuses on Finnish emissions of the new greenhouse gases, the projected growth in emissions, and the resulting need to reduce these emissions.</p> <p>Currently, emissions of new greenhouse gases amount to some 0.5 Mt of CO₂-eq. in Finland. Emissions are expected to quadruple by 2010 and to be five-fold by 2020, at which time they represent a much larger share of Finnish emissions of Kyoto greenhouse gases than presently. The substitution of ozone depleting substances by HFC-refrigerants was identified as a major driver behind the expected growth of emissions. After the first Kyoto commitment period, emissions of HFC-refrigerants were projected to contribute some 90% of the total emissions of new greenhouse gases in Finland.</p> <p>The application of emission reduction technologies to an existing equipment base is usually more problematic and less effective than applying these technologies to new equipment. For this reason, the emission reduction potential is conditional on schedule of introducing abatement measures. In the calculations of this study, most of the abatement measures were introduced in 2002. The measures considered consisted mainly of two kinds of technical reduction options: i) alternative gases and technologies and ii) leakage reduction (containment). Measures focusing on application of alternatives were significantly more expensive compared to leakage reduction. Average abatement costs of leakage reduction, weighted by potential emission reductions, were estimated as 80 FIM/t CO₂-eq. during the first Kyoto commitment period and 60 FIM/t CO₂-eq. in 2020. Greater potential emission reductions would be achievable using alternative gases and technologies, but their applicability to different emission sources is clearly more limited. The total emission reduction potential for the new greenhouse gases was estimated as 50% for the first Kyoto commitment period and 50–65% in 2020.</p>			
Keywords greenhouse gases, emissions, abatement, Finland, organic halogen compounds, hydrocarbons, sulfur fluorides, technology, economy, refrigerating equipment			
Activity unit VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5839-1 (soft back ed.) 951-38-5900-1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number N0SU00330	
Date July 2001	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 154 p. + app. 17 p.	Price B
Name of project		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	