

Delrapport 3:

Numeriska Beräkningar av

Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda

Fredrik Domhagen, Bijan Adl-Zarrabi

Contents

1. Inledning	2
1.1. Bakgrund	2
1.2. Syfte	2
1.1. Metod	2
2. Värme- och gastransport i PUR.....	3
2.1. Värmekonduktivitet.....	3
2.2. Oxidation	5
3. Numeriska beräkningsmodeller	5
3.1. Utvecklad EkoDim-modell.....	6
3.2. Finita Differensmetoden	6
4. Resultat.....	8
5. Slutsats.....	14
5.1. Framtida forskning.....	14
6. References	14

1. Inledning

Storleken av värmeförlusterna i ett fjärrvärmesystem har studerats alltsedan det första systemet byggdes. Olika typer av isoleringsmaterial har använts i svenska fjärrvärmerör. Idag är polyuretanskum (PUR) det dominerande materialet.

Polyuretanskum erhålls när en polyol och en isocyanat reagerar med varandra under bildning av polyuretan och koldioxid. Koldioxiden ger upphov till celler i polymeren. För att gynna cellbildningen används oftast förutom koldioxid, särskild bläsgas. För isolermaterial är det viktigt att denna gas har så låg värmekonduktivitet som möjligt.

Den europeiska standarden EN-253 kräver att den förväntade termiska livslängden för ett fjärrvärmerör skall vara minst 30 år vid en konstant arbetstemperatur på 120 °C. Den termiska livslängden skall vara över 50 år vid en arbetstemperatur under 115 °C. Den uppskattade livslängden enligt EN-253 är baserad på accelererande laboratorietester.

Uppskattning av livslängd i numeriska modeller bygger på kombinationer av ett antal fysikaliskt kopplade fenomen som till exempel gasdiffusion vid olika temperaturer i aktuella polymermaterial (olika typer av polyuretan för isoleringen och polyeten för mantelröret) och lösligheten för bläsgasen i polyuretanet. I många fall saknas data för dessa fenomen vilket leder till brister i de numeriska modellernas uppskattningar.

1.1. Bakgrund

PUR-isoleringens värmekonduktivitet försämras under dess tekniska livslängd, främst på grund av att gaser med lägre värmekonduktivitet (bläsgas och koldioxid) diffunderar ut ur isoleringen samt att gaser med högre värmekonduktivitet (syre och kväve) diffunderar in i isoleringen. För att uppskatta den termiska livslängden för ett fjärrvärmerör har olika teoretiska modeller för att uppskatta värmekonduktiviteten i PUR-isoleringen använts. Modellerna kräver indata om de initiala gaskoncentrationerna i PUR-isoleringen samt uppgifter om dimensioner, densitet och temperaturhistorik. Olika modeller har använts med varierande grad av komplexitet för att ta hänsyn till fenomen som påverkar gas-diffusionen. Det går inte att exakt beräkna gaskoncentrationerna samt värmekonduktiviteten även då avancerade modeller används. Detta beror på otillräckliga kunskaper om ett antal parametrar som till exempel gasblandningens värmekonduktivitet och initiala gaskoncentrationer i PUR-isoleringen.

1.2. Syfte

Syftet med detta delprojekt är att jämföra resultaten från en enklare beräkningsmodell liknande den som används i programmet EkoDim (EkoDim, 2017) med en mer avancerad modell som tar hänsyn till gaskoncentrationerna samt temperatures variation över PUR-isoleringens tvärsnitt. I den mer avancerade modellen görs även ett försök att ta hänsyn till oxidationens påverkan på koldioxid- och syrekoncentrationer i PUR-isoleringen.

1.1. Metod

För beräkningar med den enklare metoden, "Utvecklad EkoDim-modell", används Microsoft Excel. Den avancerade modellen har utvecklats i MATLAB där finita differensmetoden nyttjas för att bestämma den tidsberoende gasdiffusionen. Värmekonduktiviteten i båda modeller bestäms med Wasiljevas ekvation utifrån beräknade gaskoncentrationer. Indata, gaskoncentrationer, till modellerna kommer från mätningar utförda på fyra naturligt åldrade fjärrvärmerör där gaskoncentrationerna i PUR-isoleringen är kända för minst två olika tidpunkter. De uppmätta gaskoncentrationerna för två av rören finns presenterade i delrapport 1 och de två andra är hämtade från (Persson, 2015). För att validera de numeriska modellerna jämförs beräkningsresultaten med uppmätta värden. Eftersom endast fjärrvärmerör med PUR-isolering blåst med CO₂ och CFC-11 fanns att tillgå för validering är projektet begränsat till PUR-isoleringar blåsta med dessa gaser. Trots att CFC-11 inte används i nya rör idag är en stor del av de befintliga fjärrvärmerören

blåsta med CFC-11. Vidare görs även en jämförelse mellan beräknad värmekonduktivitet samt uppmätt värmekonduktivitet för två av rören (uppmätt värmekonduktivitet finns presenterad i delrapport 1).

2. Värme- och gastransport i PUR

Polyuretanisoleringens (PUR) värmekonduktivitet beror på värmetransport genom värmestrålning, ledning i den fasta polymeren och ledning i gasen som finns innesluten i PUR-isoleringens slutna celler. Den främsta anledningen till att isoleringens värmekonduktivitet förändras över tid är att gaser med lägre konduktivitet diffunderar ut ur isoleringen samtidigt som gaser med högre konduktivitet diffunderar in i isoleringen. För att uppskatta hur värmekonduktiviteten förändras beräknas därför gasernas diffusion över tid samt värmekonduktiviteten för den förändrande gasblandningen. Det här kapitlet beskriver ekvationer och principer som tillämpas för att beräkna isoleringens värmekonduktivitet över tid. I detta arbete antas värmetransporten genom värmestrålning samt ledning genom den fasta strukturen vara konstant över tiden.

2.1. Värmekonduktivitet

Den totala värmekonduktiviteten beräknas som summan av olika bidrag:

$$\lambda_{PUR\ isolering} = \lambda_{gas} + \lambda_{fast\ polymer} + \lambda_{värmestrålning} [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (1)$$

Värmestrålning är starkt beroende av temperatur, där högre temperatur ger högre värmetransport. Värmestrålningen kan beräknas med Rosselands ekvation som gäller för isotropa och optiskt tjocka material:

$$\lambda_{värmestrålning} = \frac{16\sigma T^3}{3E} [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (2)$$

där σ är Stefan-Boltzmanns konstant, $5.67 \cdot 10^{-8} [Wm^{-1}K^{-1}]$, $T [K]$ är temperaturen och $E [m^{-1}]$ är Rosselands medelextinktionskoefficient. Extinktionskoefficienten bestäms genom mätning (N. C. Hilyard, 1994).

Värmekonduktivitet i den fasta polymeren beräknas med följande ekvation:

$$\lambda_{fast\ polymer} = (0.48 \cdot f_s + 0.66 \cdot (1 - f_s)) \cdot (1 - f_g) \cdot \lambda_{PUR} [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (3)$$

där $f_g [-]$ är porositet, $\lambda_{PUR} [W \cdot m^{-1}K^{-1}]$ är värmekonduktiviteten för PUR i solid form och $f_s [-]$ är andelen "struts" i polymerskummet, för PUR är detta vanligtvis 0.90-0.95 (Persson, 2015). Med "struts" avses den ansamling av polymermaterial till områden där flera celler möts och där nästan all polymer finns eftersom cellväggarna är mycket tunna. I studier (Biedermann, 2001) har man även tagit hänsyn till cellernas form och cellväggarnas tjocklek. Detta beaktas dock inte i detta arbete.

Bidraget till ledning genom cellgasen beräknas som produkten av gasens konduktivitet och isoleringens porositet (N. C. Hilyard, 1994):

$$\lambda_{gas} = f_g \cdot \lambda_g [W/mK] \quad (4)$$

Gasblandningens värmekonduktivitet är svår att beräkna på grund av de ingående gasernas inverkan på varandra. Metoder som används för att bestämma värmekonduktiviteten för en gasblandning baseras normalt på empiriska mätningar. Metoden som används i det här projektet är Wassiljevas ekvation med Mason och Saxenas modifikation och med användning av gasviskositeter (Persson, 2015), (N. C. Hilyard, 1994):

$$\lambda_g = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n y_i A_{ij}} [Wm^{-1}K^{-1}] \quad (5)$$

$$A_{ij} = \varepsilon \frac{\left[1 + \sqrt{\frac{\lambda_{tr,i}}{\lambda_{tr,j}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{0.25}} \right]^2}{\sqrt{8 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)}} [-] \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_{tr,i}}{\lambda_{tr,j}} = \frac{\eta_i}{\eta_j} \cdot \frac{M_j}{M_i} [-] \quad (7)$$

där y [-] molbråk, λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$] är värmekonduktivitet, M [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$] är molmassa, ε [-] justeringsfaktor som vanligen sätts till 1.0 och η [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$] är gasens viskositet.

2.2. Gaspermeabilitet

På grund av olika gaskoncentrationer i PUR-isoleringen och i omgivningen runt mantelröret sker gastransport från högre till lägre koncentrationer. För gaser som N_2 , O_2 och CO_2 återfinns det största transportmotståndet i mantelröret medan det däremot för CFC-11 är störst transportmotstånd i PUR-isoleringens cellväggar.

Gastransport genom ett homogent material beror på löslighet vid ytan av materialet och diffusion genom materialet. Transporten beskrivs med löslighetskoefficienten S [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$] och diffusionskoefficienten D [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]. Eftersom PUR-isolering är ett poröst material beskrivs koefficienterna som effektiva koefficienter, D_{eff} och S_{eff} . Under isoterma förhållanden kan permeabiliteten, P [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$], beskrivas som produkten av löslighetskoefficienten och diffusionskoefficienten (Persson, 2015).

Fick's lag beskriver diffusion genom ett material:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8)$$

där j [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$] är flöde, c [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$] är koncentration och D [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] är diffusionskoefficienten.

Gastransporten är temperaturberoende, vilket innebär att högre temperatur ger större diffusionskoefficienter och större permeabilitetskoefficienter. För att beskriva detta samband används Arrhenius relation:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot e^{-\frac{E_D}{R \cdot T}} \quad (9)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{E_P}{R \cdot T}} \quad (10)$$

där D_0 har enheten [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], P har enheten [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$], E_D samt E_P är aktiveringsenergier med enheten [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$] (konstanterna bestäms genom passning mot mätdata) och $R = 8.314$ [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$] är allmänna gaskonstanten.

2.3. Diffusions- och permeabilitetskoefficienter för PUR och mantelrör

Gasdiffusionskoefficienter i detta arbete är hämtade från tidigare arbeten. Nedan sammanfattas de koefficienter som använts vid beräkningar. Samtliga värden förutom D_0 och E_D för CFC-11 är hämtade från (Persson, 2015). Värden för CFC-11 är framtagna genom passning mot mätdata från (Alsoy, 1999). Detta ger $D_{\text{eff}} = 2.0 \cdot 10^{-14}$ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] vid 25 °C vilket är i överensstämmelse med tidigare uppmätta värden t.ex. $D_{\text{eff}} = 2.3 \cdot 10^{-14}$ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] vid 25 °C (Brodt, 1995).

Tabell 1. Konstanter som används vid bestämning av diffusionskoefficienter med Arrhenius ekvation.

	CFC-11	CO ₂	N ₂	O ₂
D_0 [$10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	58.2	4.77	10	3.39
E_D [$10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$]	6.54	3.98	5.42	4.16

Tabell 2. Konstanter som används vid bestämning av permeabilitetskoefficienter med Arrhenius ekvation.

	CO ₂	N ₂	O ₂
P ₀ [10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹]	0.56	5.44	2.97
E _P [10 ⁴ J·mol ⁻¹]	2.7	3.92	3.48

För beräkningar i den utvecklade EkoDim-modellen används diffusionskoefficienter vid en temperatur på 50 °C och permeabilitetskoefficienter vid en temperatur på 20 °C. Samtliga värden i Tabell 3 är beräknade utifrån koefficienterna i Tabell 1 och Tabell 2 (notera att dessa värden avviker något från de värden som EkoDim använder):

Tabell 3. Beräknade permeabilitetskoefficienter för mantelrör vid 20 °C och diffusionskoefficienter för PUR vid 50 °C. Beräkningar enligt Arrhenius ekvation med konstanter från tabellerna ovan.

	CFC-11	CO ₂	N ₂	O ₂
D _{eff} (PUR, 50 °C)	1.54e-13	-	-	-
P (mantelrör, 20 °C)	-	8.6e-16	5.58e-17	1.86e-16

2.4. Oxidation

Polyuretanskum oxideras av luftens syre så att bland annat skummets mekaniska egenskaper påverkas. Oxidation sker sannolikt i olika delsteg innan oxidationen har gått så långt att det börjar bildas koldioxid. Oxidationen kan antas bero på syrets partialtryck inuti cellen, vilket i sin tur beror på cellens storlek och cellväggens egenskaper så som diffusionsmotstånd och förekomsten av mycket små porer. Syreförbrukningen har bl.a. mätts för polyuretanskum med öppna celler (Assink, 2005). Där det mättes att syreförbrukningen ökade från cirka 0.8·10⁻¹² [mol·s⁻¹] vid 50 °C till cirka 4.0·10⁻¹⁰ [mol·s⁻¹] vid 125 °C.

I denna rapport görs beräkningar för ett mycket förenklat och summariskt oxidationsförlopp:



För modellering kan reaktionshastigheten, r_0 , med avseende på syrgasförbrukningen skrivas:

$$r_0 = -\frac{d[\text{O}_2]}{dt} \quad [\text{mol/s}] \quad (11)$$

där, O₂ [mol] är mängden syre, kan även uttryckas som partialtryck [Pa], och t [s] är tid.

Observera att det sannolikt förbrukas mer syre än det bildas koldioxid, åtminstone tills det att all PUR är "fullständigt deloxiderad".

För att ta hänsyn till reaktionshastighetens temperaturberoende används Arrhenius relation:

$$r = r_0 \cdot e^{-\frac{E_0}{R \cdot T}} \quad (12)$$

där T [K] är temperaturen, E₀ [J·mol⁻¹] är aktiveringsenergin och R = 8.314 [J·mol⁻¹K⁻¹] är allmänna gaskonstanten.

Eftersom mätningar saknas för reaktionshastigheter för oxidation av PUR för fjärrvärmerör antas i detta projekt ett linjärt samband mellan reaktionshastighet och syrekonzentration för oxidation av PUR vid konstant temperatur (Chieh, 2017) och (Chemistry, 2017).

3. Numeriska beräkningsmodeller

I detta kapitel beskrivs de två numeriska metoderna som använts, den utvecklade EkoDim-modellen samt en modell som tillämpar finita differensmetoden.

3.1. Utvecklad EkoDim-modell

Metoden som använts är densamma som används i EkoDim därför hänvisas läsaren till (Jarfelt, 2002) för en mer detaljerad beskrivning. Beräkningarna utförs däremot i Microsoft Excell för bättre kontroll över indata samt resultat. Detta är även anledningen till varför modellen i detta arbete refereras till som "Utvecklad EkoDim-modell". Vid beräkning av gasdiffusionen beräknas endast en koncentration för varje gas vid varje tidssteg och för hela isoleringen. För N₂, O₂ och CO₂ antas allt diffusionsmotstånd ligga i mantelröret. För CFC-11 antas allt motstånd ligga i PUR-isoleringen. Värmeledningskoefficienten samt diffusionskoefficienternas temperaturberoende beaktas endast genom att anta att de följer medeltemperaturen över PUR-isoleringen. Vid beräkning av PUR-isoleringens värmeledningskoefficient används Wassiljevas ekvation (Ekvation 5, 6 & 7) och till detta adderas bidragen från värmestrålning och värmeledning enligt Ekvation 1.

3.2. Finita Differensmetoden

För noggrannare beräkning av gasdiffusionen i isoleringen tillämpas Explicita Differensmetoden enligt den princip som finns beskriven i (Persson, 2015) därutöver tas även hänsyn till oxidation enligt nedan beskriven metod.

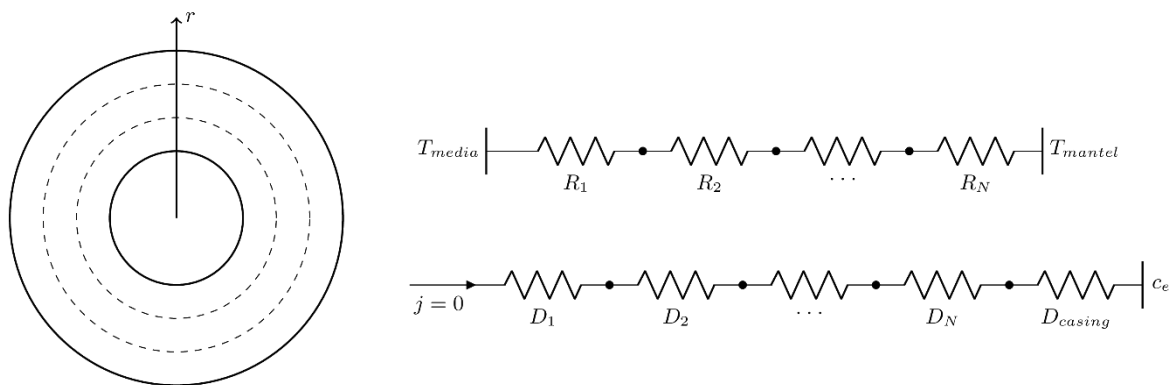
Den numeriska modellen skrivs objektorienterat i Matlab vilket underlättar för implementering i andra programmeringsspråk. Detta innebär även att programmet är flexibelt och lätt att komplettera med ytterligare metoder som till exempel möjlighet att göra beräkningar på dubbelrör.

Modellen avser beräkningar av enkelrör med gasflöden i en dimension. Med omskrivning av Ekvation 8 kan flödet beskrivas i radiella koordinater (då antas flödet vara lika stort vid samma avstånd från rörets centrum):

$$D \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot j) \quad (13)$$

där D [m²s⁻¹] är diffusionskoefficienten, c [mol·m⁻³] är koncentrationen, t [s] är tiden, r [m] är radien och j [mol·m⁻²s⁻¹] är massflöde.

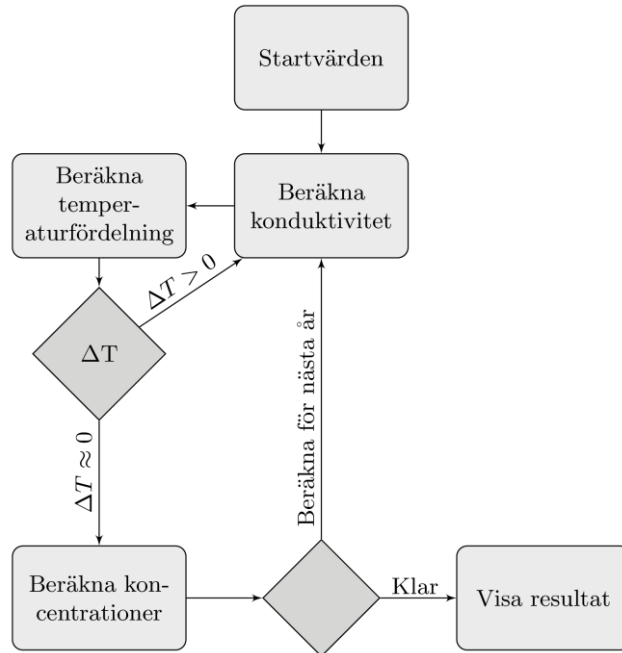
Mellan mediarör och isolering sker inget gasflöde medan vid mantelrör och omgivning sker ett flöde. Gasdiffusionen genom isolering och mantelrör löses numeriskt med Explicita Finita Differensmetoden. I metoden delas rörsnittet in i ett antal celler, se Figur 1 (vänster), där gasflödet till och från varje cell beräknas för varje tidssteg. Flödet kan beskrivas med kretsanalys enligt Figur 1 (höger) där varje nod representerar en cell och varje krets representerar flödesmotståndet mellan två celler.



Figur 1. Principskiss över tvärsnitt på ett fjärrvärmerör (Vänster). Kretsrepresentation för värme- och gastransport (Höger).

Med kända gasflöden till och från varje cell vid ett givet tidssteg kan koncentrationen för cellen uppdateras och gasflöden för nästa tidssteg beräknas. För en mer utförlig beskrivning av den teoretiska bakgrunden till modellen hänvisas läsaren till (Persson, 2015).

Eftersom gastransporten är temperaturberoende och eftersom värmekonduktiviteten är beroende av gasernas koncentration behöver gastransport och värmetransport uppdateras som ett kopplat fenomen. Dock har (Persson, 2015) visat att tillräcklig noggrannhet uppnås om temperaturerna i cellerna uppdateras kvasistationärt med ett års intervall. Detta beror på att det krävs relativt stora förändringar i värmekonduktivitet för att ge märkbara förändringar i cellernas temperaturer. Figur 2 visar ett flödesschema över modellens beräkningsgång.



Figur 2. Flödesschema över modellens (Finita Differensmetoden) beräkningsgång.

För att bestämma värmeflödet genom ett cylindriskt tvärsnitt (se Figur 1) används följande ekvation:

$$Q = \frac{T_{media} - T_{mantel}}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (14)$$

där T_{media} [K] är mediatemperatur och T_{mantel} [K] är mantelns temperatur. Värmemotståndet för varje cylindriskt skikt kan beräknas med:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda} \quad (15)$$

där r_1 [m] och r_2 [m] är radien till respektive sida om skiktet och λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] är skiktets värmekonduktivitet. I modellen används dessa ekvationer för att beräkna den ekvivalenta värmekonduktiviteten för hela rörets tvärsnitt.

Slutligen kan ett antal grundläggande antaganden om modellen sammanfattas:

- Gaserna i isoleringen transporteras oberoende av varandra.
- Drivkraften för gastransporten är skillnader i gaskoncentration.
- Värmemotstånd för mediarör och mantelrör försummas.
- Temperaturer uppdateras kvasistationärt varje år.
- Randvillkor antas vara konstanta, dvs. yttre förhållanden som gaskoncentrationer och temperaturer är konstanta.

3.2.1. Oxidation

Vid varje tidssteg och för varje cell tas även hänsyn till oxidation där koncentrationen av O_2 och CO_2 uppdateras enligt Ekvation 11 och 12 med följande samband:

$$r_t = [O_2]_t \cdot k_0 \cdot e^{-\frac{E_0}{R \cdot T}} \quad (16)$$

$$ox_t = \Delta t \cdot r_t \quad (17)$$

$$[O_2]_{t+1} = [O_2]_t - ox_t \quad (18)$$

$$[CO_2]_{t+1} = [CO_2]_t + ox_t \quad (19)$$

där $[O_2]$, $[CO_2]$ är syre- och koldioxidkoncentrationer, t är tidssteget

Detta betyder att syre- och koldioxidkoncentrationerna påverkas mer vid högre temperaturer och högre syrekoncentrationer. Metoden tar inte hänsyn till eventuell påverkan på förändring i PUR-materialet egenskaper som en följd av oxidationen.

Konstanterna k_0 och E_0 bestäms genom passning mot mätdata. Det vill säga metoden för oxidation tillämpas i modellen där konstanterna anpassas tills de stämmer med uppmätta värden. Samma värden för konstanterna används i samtliga simuleringar.

4. Resultat

De båda beräkningsmodellerna testats mot mätvärden för fyra olika rör. För rör 1 och 2 finns mätvärden från flera tidpunkter (rör från Hisings Backa, delrapport 1), däremot för rör 3 och 4 finns mätvärden endast för två tidpunkter. Vidare finns endast uppmätt värmekonduktivitet för rör 1 och 2.

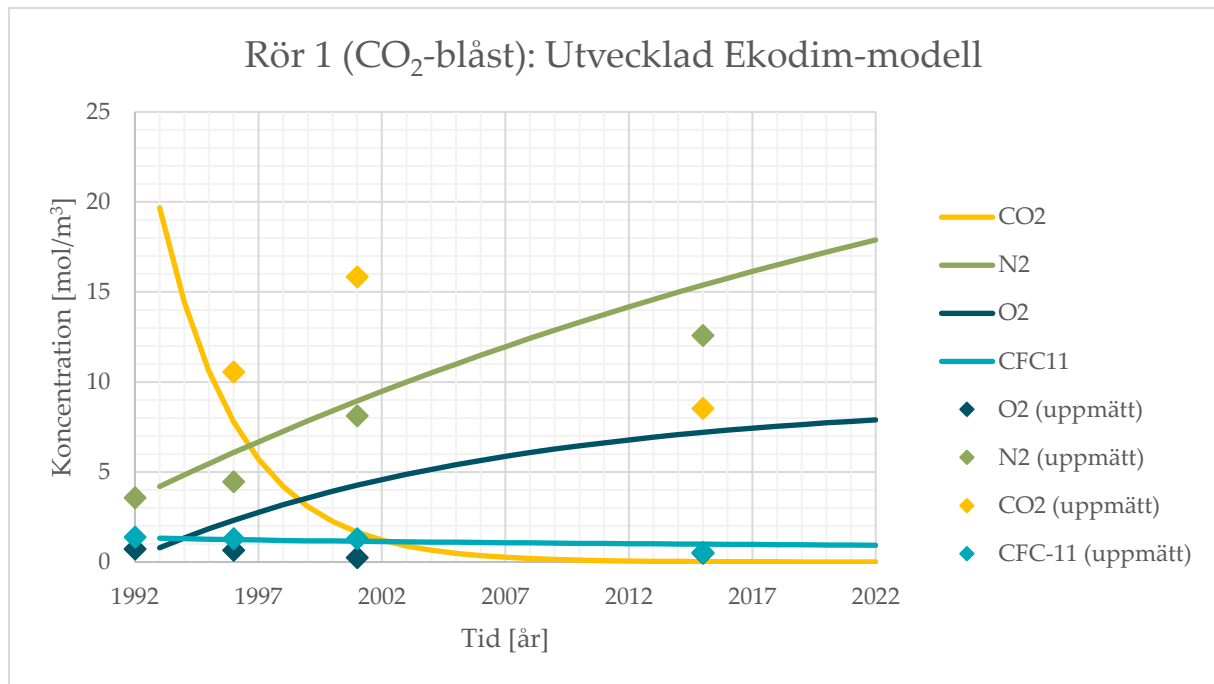
Tabell 1. Rördimensioner, PUR-isoleringens densitet samt typ av rör.

	Mediarörets diameter [mm]	Mantelrörets diameter [mm]	PE-rörets tjocklek [mm]	PUR densitet [kg/m³]	Typ av rör
1*	168	284	5.0	81	CO ₂ -blåst
2*	168	284	5.0	66	CFC11-blåst
3**	48	125	3.9	72	CFC11-blåst
4**	273	450	8.7	78	CFC11-blåst

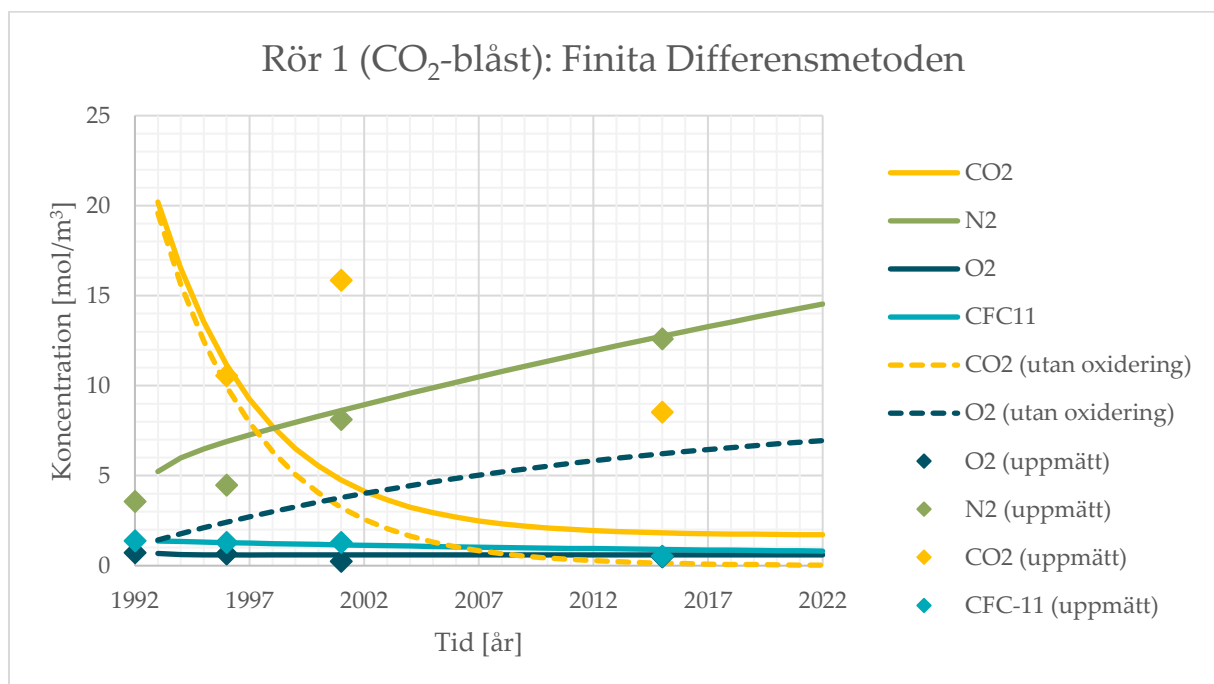
* Indata samt mätdata hämtad från "delrapport 1". ** Indata samt mätdata hämtad från (Persson, 2015).

Beräkningsresultaten presenteras i Figurer 3-9 där genomsnittliga koncentrationer för de olika rören presenteras tillsammans med uppmätta värden.

I modellerna antas att gaskoncentrationerna som omger röret är desamma som för luft vid marknivå (Jarfelt, 2002) ($CO_2 = 0 \%$, $N_2 = 78 \%$, $O_2 = 22 \%$). Dock har (H. Enoch, 1971) visat att höga halter av CO_2 kan förekomma i marken i halter över 40 % (volymprocent) på djup ner till 47.5 cm. Förklaringen till de förhöjda halterna är bland annat hög mikrobiologisk aktivitet. Förhöjda koldioxidhalter i marken kan förklara varför modellerna i flera av fallen underskattar mängden koldioxid i PUR-isoleringen.



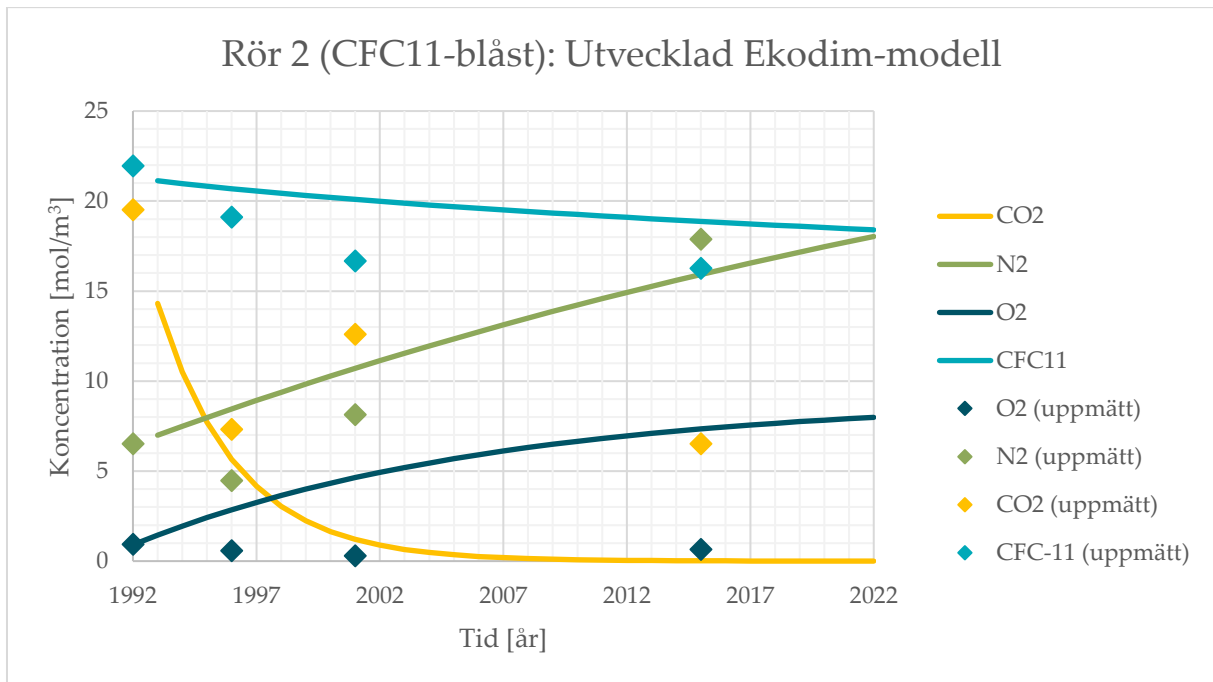
Figur 3. Resultat från beräkning med den utvecklade EkoDim-modellen för rör 1 (uppmätt mängd syre och CFC-11 ligger i samma punkt 2015).



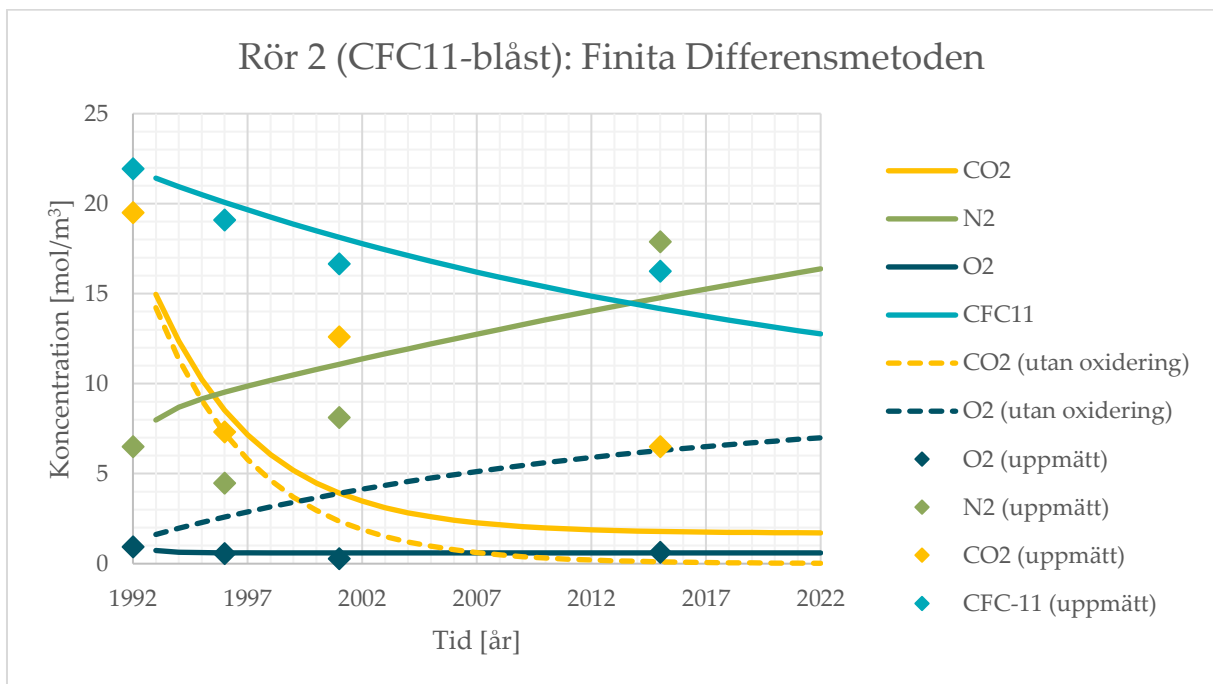
Figur 4. Resultat från beräkning med Finita Differensmetoden för rör 1 (uppmätt mängd syre och CFC-11 ligger i samma punkt 2015).

Beräkningen med finita differensmetoden (rör 1) hamnar närmare uppmätta värden för samtliga gaser jämfört med den utvecklade EkoDim-modellen. Hänsyn till oxidation gör även att mängden syre hamnar nära uppmätta värden och att mängden koldioxid närmar sig uppmätta värden. Däremot tycks båda modeller underskatta mängden koldioxid. Vid höjning av koldioxidhalten i marken från 0 % till 15 %

(7 mol/m³) erhålls med finita differensmodellen och med hänsyn till oxidation mycket bra överensstämmelse mellan modellens beräknade värden och den sista mätpunkten.



Figur 5. Resultat från beräkning med Finita Differensmetoden rör 2.



Figur 6. Resultat från beräkning med Finita Differensmetoden för rör 2.

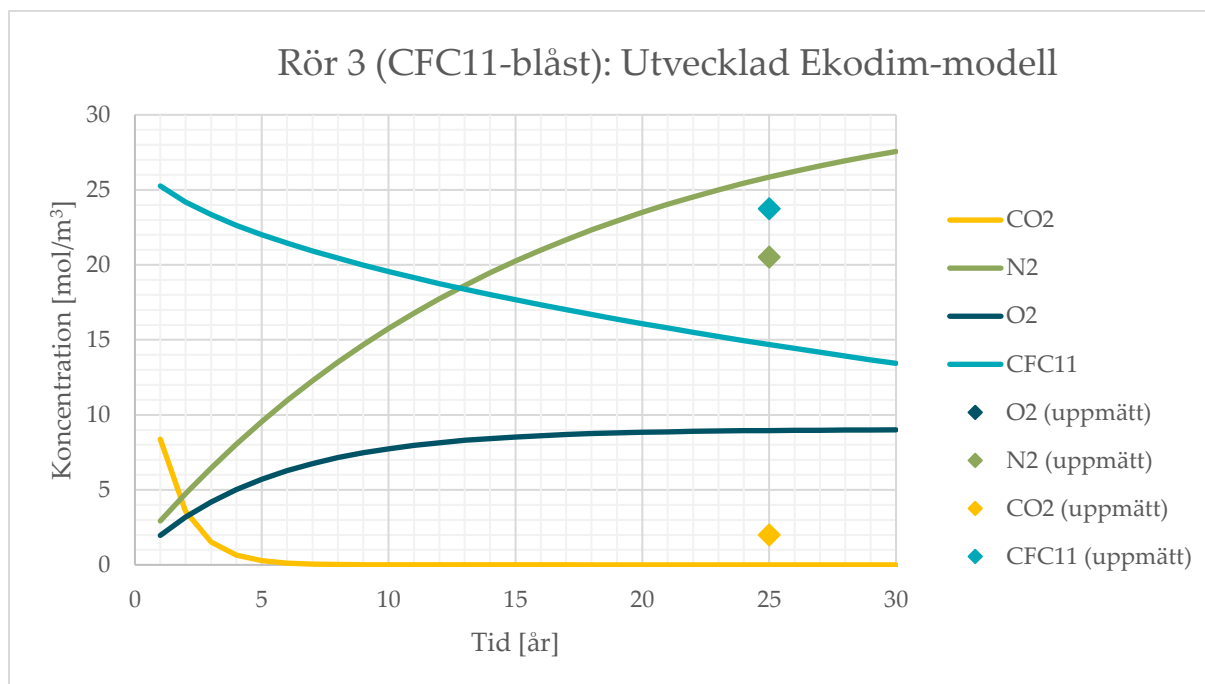
Båda modeller hamnar i närheten av uppmätta nivåer (rör 2) för kväve och CFC-11, där den utvecklade EkoDim-modellen underskattar mängden CFC-11 något och beräkningen med finita differensmetoden underskattar mängden kväve något. Orsaken till detta kan vara avvikelser i diffusionskoefficienterna. Om diffusionskoefficienten för CFC-11 minskas med en faktor 0.44 i beräkningen med finita differensmetoden fås god överensstämmelse mellan beräkning och uppmätta värden. Avvikelsen kan därför eventuellt förklaras av felaktiga mätvärden eller överskattad diffusionskoefficient.

I rör 2 underskattas mängden koldioxid i båda modeller. Vid höjning av koldioxidhalten i marken från 0 % till 11 % (5 mol/m^3) erhålls med finita differensmodellen och med hänsyn till oxidation mycket bra överensstämmelse mellan modellens beräknade värden och den sista mätpunkten. I Tabell 4 jämförs beräknad värmekonduktivitet enligt de båda modellerna och uppmätt värmekonduktivitet. Värmekonduktiviteten är beräknad utifrån de gaskoncentrationer som finns presenterade för rör 1 och 2, Figur 3-6, (för finita differensmetoden tas hänsyn till både oxidation och förhöjda koldioxidhalter i marken) samt tillskott från värmeledning i den fasta polymeren och strålning. Skillnader i värmekonduktivitet mellan de båda modellerna beror på att den utvecklade EkoDim-modellen endast beräknar värmekonduktiviteten baserad på en medelkoncentration av gaserna och för en temperatur på 50°C . I finita differensmetoden kan däremot värmekonduktiviteten bestämmas för varje cell och den ekvivalenta värmekonduktiviteten beräknas enligt Ekvation 14 och 15. Ekvivalenta värmekonduktiviteten beräknas för en medeltemperatur på 80°C och manteltemperatur på 20°C .

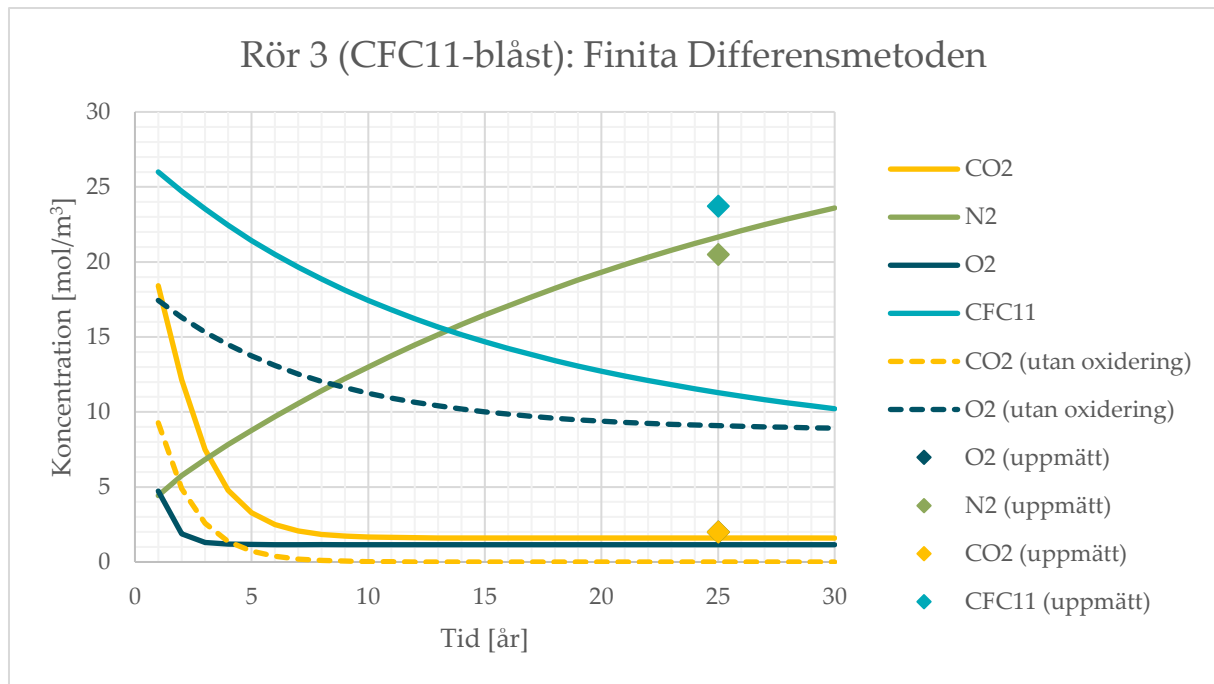
Tabell 4. Beräknade samt uppmätta värmekonduktiviteter för rör 1 och rör 2, år 2015.

	Uppmätt [mW/m·K]	Utvecklad EkoDim-modell [mW/m·K]	Finita Differensmetoden [mW/m·K]
Rör 1 (CO_2)	35.2	32.9	34.4
Rör 2 (CFC11)	28.5	25.4	25.6

Skillnader mellan beräknade och uppmätta värden på värmekonduktivitet kan i huvudsak bero på två saker. Felaktiga mätdata på vilka de beräknade värmekonduktiviteter är baserade enligt bl.a. Wassiljevas ekvation. Eller variationer i värmetransport genom strålning vilket kan variera mellan olika PUR-isoleringar. Värmetransporten p.g.a. ledning genom den fasta polymeren varierar normalt inte mycket mellan olika PUR-isoleringar (Persson, 2015).



Figur 7. Resultat från utvecklad EkoDim-modell för rör 3 (uppmätt mängd syre och koldioxid ligger i samma punkt år 25).

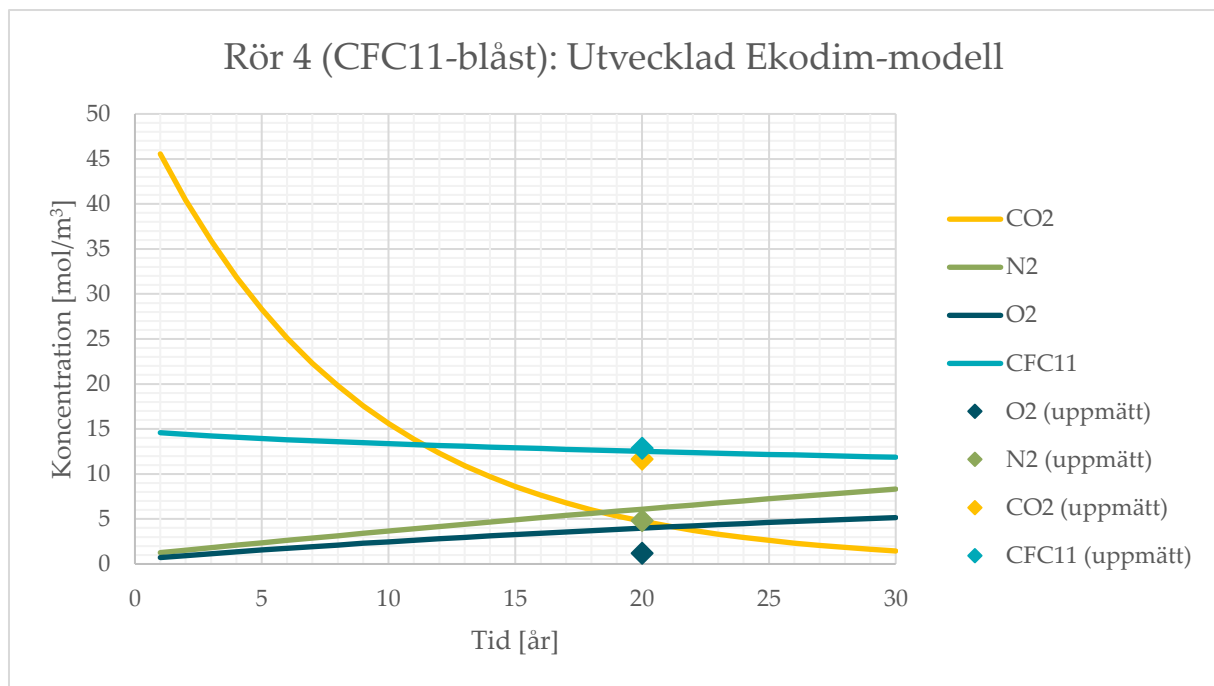


Figur 8. Resultat från beräkning med finita differensmetoden för rör 3 (uppmätt mängd syre och koldioxid ligger i samma punkt år 25).

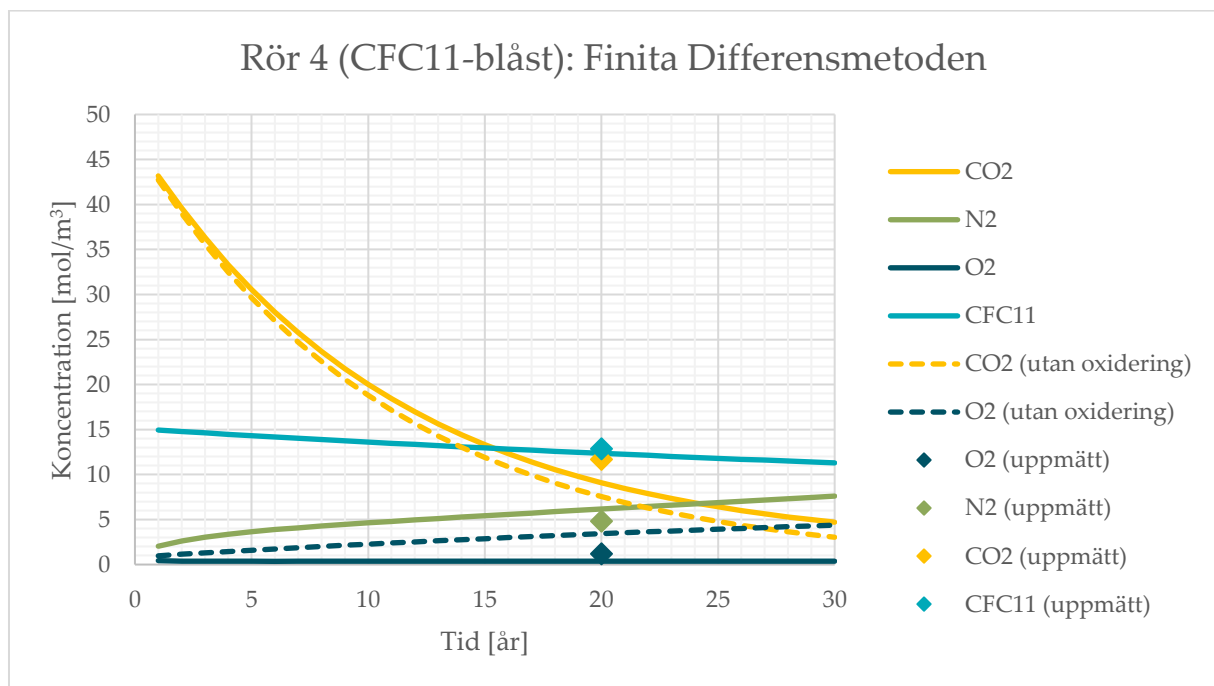
Beräkningen med finita differensmetoden (rör 3) hamnar nära uppmätta värden för samtliga gaser förutom CFC-11. Hänsyn till oxidation i beräkningen visas även vara avgörande för hur nära de beräknade värdena hamnar uppmätta värden för syre och koldioxid. Den utvecklade EkoDim-modellen hamnar inte nära uppmätta värden för någon av gaserna.

För rör 2 och rör 3 som båda har höga initiala koncentrationer av CFC-11 (över $25 \text{ [mol/m}^3\text{]}$) tycks båda modellerna underskatta CFC-11 koncentrationen. Diffusionskoefficienten för CFC-11 är koncentrationsberoende (eller beroende av partialtryck) enligt (Alsoy, 1999), där högre koncentrationer ger högre diffusionskoefficient. Detta innebär att modellerna borde överskatta mängden CFC-11 snarare än underskatta. En möjlig förklaring kan vara att diffusionskoefficienter och löslighetskoefficienter varierar mellan olika PUR-skum.

Om diffusionskoefficienten för CFC-11 minskas med en faktor 0.15 i beräkningen med finita differensmetoden (rör 3) fås god överensstämmelse mellan beräkning och uppmätta värden.



Figur 9. Resultat från utvecklad EkoDim-modell för rör 4.



Figur 10. Resultat från beräkning med finita differensmetoden för rör 4.

För rör 4 hamnar beräkningen med finita differensmetoden nära de uppmätta värdena för samtliga koncentrationer. Även för detta fall har hänsyn till oxidation avgörande betydelse för hur nära de beräknade värdena uppmätta värden hamnar med avseende på syre och koldioxid. Beräkningen med den utvecklade EkoDim-modellen hamnar nära uppmätta värden för samtliga gaser förutom koldioxid och syre.

För rör 1 och rör 2 (Hisings Backa) saknas temperaturhistorik. Istället har temperaturhistorik från ett annat rör (Marieholm) använts då detta enligt Göteborg Energi anses vara representativt för rören i Hisings

Backa. Eftersom gasdiffusionen är temperaturberoende kan missbedömningar i modellerna eventuellt förklaras av oriktiga uppgifter om temperaturförhållanden.

På liknande sätt är temperaturhistoriken för rör 3 och 4 baserat på antaganden om temperaturhistorik där experter från Göteborg Energi har uppskattat rimliga värden (Persson, 2015).

5. Slutsats

Med avseende på gaskoncentrationens förändring över tid presterar modellen baserad på finita differensmetoden bättre än den utvecklade EkoDim-modellen. Inte oväntat gäller detta särskilt för rör med låga koncentrationer av CFC-11. För rör med höga koncentrationer av CFC-11 underskattas däremot koncentrationen av CFC-11. För att öka noggrannheten krävs mätningar av diffusionskoefficienten samt löslighetskoefficienten för CFC-11 vid olika koncentrationer samt olika temperaturer.

För beräkningen med finita differensmetoden introduceras även en metod för att ta hänsyn oxidationens påverkan på syre- och koldioxidkoncentrationer. Metoden bidrar till att beräknade värden för syre och koldioxid hamnar närmre uppmätta värden. Syrekoncentrationerna hamnar för de flesta fall mycket nära uppmätta värden, däremot underskattas mängden koldioxid för flera av fallen.

En möjlig anledning till att koldioxidhalterna underskattas för två av rören kan förklaras av förhöjda halter av koldioxid i marken (dvs. koldioxidhalterna i marken är högre än i luften ovan mark). Detta bekräftas av beräkningar då koldioxidhalten i marken höjs för två av rören till 11 % och 15 % respektive vilket resulterar i avsevärt bättre överensstämmelse med uppmätta värden.

5.1. Framtida forskning

För ytterligare utveckling av modellerna föreslås vidare forskning med fokus på följande punkter:

- För ökad noggrannhet krävs bestämning av diffusionskoefficient samt löslighetskoefficient för CFC-11 vid olika temperaturer och koncentrationer.
- Metoden för att ta hänsyn till oxidation är för närvarande mycket enkel och bör utvärderas ytterligare.
- För att säkerställa modellens noggrannhet krävs validering mot fler mätvärden.
- Klargörande av gashalter i marken kring rören. Mätning av koldioxidhalter i marken kring fjärrvärmerör.

6. References

- Alsoy, S. (1999). Modeling of Diffusion in Closed Cell Polymeric Foams. *Journal of Cellular Plastics*.
- Assink, R. A. (2005). Use of a respirometer to measure oxidation rates of polymeric materials at ambient temperatures. *Polymer*, 11648-11654.
- Biedermann, A. (2001). Analysis of heat transfer mechanisms in polyurethane rigid foam. *Journal of cellular plastics*, 467-483.
- Brodt, K. (1995). *Thermal insulations: cfc-alternatives and vacuum insulation*. Leiden, The Netherlands.
- Chemistry. (2017). Retrieved from LibreTexts: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Kinetics/Rate_Laws/Reaction_Mechanisms/Elementary_Reactions
- Chieh, C. (2017). *Chem*. Retrieved from Chem: <http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/cact.html>
- EkoDim. (2017). Retrieved from <http://www.svenskfjarrvarme.se/Medlem/Fokusomraden-/Distribution/Auktorisation/>

- H. Enoch, S. D. (1971). The occurrence of high CO₂ concentrations in soil air. *Geoderma*, 17-21.
- Jarfelt, U. (2002). *EkoDim - Beräkningsprogram lönar det sig att isolera mera?* Chalmers Tekniska Högskola.
- N. C. Hilyard, A. C. (1994). *Low Density Cellular Plastics*.
- Persson, C. (2015). *Predicting the Long-Term Insulation Performance of District Heating Pipes*. Gothenburg: Chalmers University of Technology.