



ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

# Modellering av oljedegenerering

GUSTAV LINDGREN

Examensarbete, Teknisk Fysik,  
utfört på Scania AB  
Februari, 2011

ISSN 0280-316X  
TRITA-FYS 2011:11  
ISRN KTH/FYS/-11:11-SE



# Referat

Examensarbetets mål var att skapa en modell för oljedegenerering, för implementering i lastbilens styrsystem. En modell som är lämplig för implementering måste vara enkel nog för att kunna hanteras av styrsystemet och samtidigt tillförlitlig nog för att varken över- eller underskatta oljebytesintervallet allt för mycket. Onödigt täta oljebyten medför ökade kostnader för ny olja och produktionsbortfall medan för glesa oljebyten kan orsaka allvarliga skador på motorn med tillhörande kostnader.

Modellen delades upp i fyra delmodeller svarandes mot dom olika processer som styr oljedegenereringen; bränsleutspädning, kemisk degradering, sotinblandning och kondensbildning. Delmodellerna skapades med utgångspunkt i publicerade studier av dom olika förloppen varefter dom implementerades i Matlab och jämfördes med mätdata som fanns tillgängliga på Scania. Då det var möjligt jämfördes olika modifieringar av modellerna för att undersöka vilken som gav bäst överensstämmelse med mätdata.

Bränsleutspädning, sotbildning och vattenutspädning är relativt väl förstådda förlopp och deras beroende av olika parametrar är välkänt. Oljans kemiska degradering är ett betydligt mer komplicerat förlopp som beror av ett flertal olika faktorer och som därför är betydligt svårare att modellera.

Av dom fyra delmodeller som skapades gav modellen för bränsleutspädning bäst överensstämmelse då den jämfördes med mätdata. Data fanns endast tillgängliga för bränslets avdunstning ur oljesumpen och det är därför okänt hur väl modellen för inflödet stämmer. Då modellen för inflöde är kraftigt förenklad finns det anledning att misstänka att överensstämmelsen inte är allt för god. Modellen för oljedegradering gick inte att verifiera med tillgängliga data och ytterligare försök är nödvändiga. Det konstaterades att oljetemperaturen är viktig för degraderingstakten, men att en modell baserad enbart på temperaturen inte är tillräcklig.

Inte heller vattenutspädningsmodellen kunde verifieras. För detta kommer det att krävas direkt mätning av varje delflöde i modellen, vilket kommer att möjliggöra en noggrann verifiering med endast ett fåtal mätningar. Den modell för oljesotbildning som fanns tillgänglig på Scania bedömdes vara tillräckligt bra och ingen ytterligare utveckling av denna modell har gjorts. Modellen har endast dokumenterats kortfattat.

# Abstract

## Modelling of Oil Deterioration

The aim of this thesis project was to create a model of engine oil deterioration, suitable for implementation in the engine control unit. To this end, the model has to be sufficiently simple not to unnecessarily waste limited computing power and yet exact enough not to over- or underestimate the oil change interval too much. Too frequent oil changes mean an unnecessary extra cost for new oil and loss of availability while too long oil change intervals may damage the engine, at an even greater cost. The model was divided into four sub-models, one for each of the processes that cause oil deterioration, i.e. dilution by fuel, chemical degradation, soot contamination and dilution by water. The models created were based on publicized scientific studies of the various processes. In order to validate the models they were implemented in Matlab and compared with experiment data. Various modification attempts were made and the resulting models were evaluated based on their correspondence with measurements.

Dilution by fuel, dilution by water and soot contamination are all processes whose causes and dynamics are relatively well known. Oil degradation on the other hand is a complex process that depends on a large number of factors which makes it very complicated to model. This is especially problematic as oil degradation usually is limiting for oil change intervals.

Out of the four sub-models that were created, the model for fuel dilution gave the best correspondence with measurements. However data was only available for the part of the model handling evaporation and thus it is unknown how well the model for fuel influx performs. As the model is very simple there is reason to believe that the correspondence between the modelled influx and the actual influx is not very good.

The model for oil degradation could not be validated using the available data and further experiments are necessary. However it was concluded from the data available that a model based only on oil temperature, as was first intended, will not be sufficient.

The water dilution model was reasonably accurate in predicting average water concentrations, but missed short term variations completely. In order to fully validate the model, further experiments, where the various rates of condensation are measured, will be necessary.

The model for oil-soot already available at Scania was considered sufficient and no further work has been done on this model. A short description of the model has been included for completeness.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Oljans funktion</b>	<b>3</b>
2.1	Oljans degenerering . . . . .	3
2.1.1	Oljedegradering . . . . .	3
2.1.2	Bränsleutspädning . . . . .	4
2.1.3	Oljesot . . . . .	5
2.1.4	Vattenutspädning . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>7</b>
3.1	Tidigare lösningar . . . . .	7
3.2	Modeller för oljedegenerering . . . . .	7
3.2.1	Bränsleutspädning . . . . .	8
3.2.2	Oljedegradering . . . . .	8
3.2.3	Oljesotbildning . . . . .	9
3.2.4	Vattenutspädning . . . . .	9
3.2.5	Sammanfattning av litteraturstudien . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Modellering</b>	<b>11</b>
4.1	Bränsleutspädning . . . . .	11
4.1.1	Inledning . . . . .	11
4.1.2	Modellbeskrivning . . . . .	11
4.1.3	Kalibrering . . . . .	14
4.1.4	Mätdata . . . . .	15
4.1.5	Resultat . . . . .	15
4.1.6	Diskussion . . . . .	18
4.2	Oljedegradering . . . . .	20
4.2.1	Inledning . . . . .	20
4.2.2	Modellbeskrivning . . . . .	20
4.2.3	Kalibrering . . . . .	21
4.2.4	Mätdata . . . . .	22
4.2.5	Resultat . . . . .	27
4.2.6	Diskussion . . . . .	28
4.3	Oljesotbildning . . . . .	29
4.3.1	Inledning . . . . .	29
4.3.2	Diskussion . . . . .	31
4.4	Vattenutspädning . . . . .	32

4.4.1	Modellbeskrivning . . . . .	32
4.4.2	Resultat . . . . .	36
4.4.3	Diskussion . . . . .	43
4.5	Temperaturmodeller . . . . .	44
4.5.1	Temperatur i turboaggregat . . . . .	44
4.5.2	Temperatur efter kolvkylning och i oljesump . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Sammanfattning av resultat</b>	<b>49</b>
5.1	Bränsleutspädning . . . . .	49
5.2	Oljedegradering . . . . .	49
5.3	Oljesotbildning . . . . .	49
5.4	Vattenutspädning . . . . .	49
5.5	Temperaturmodeller . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Förslag till vidare arbete</b>	<b>53</b>
7.1	Bränsleutspädning . . . . .	53
7.2	Oljedegradering . . . . .	55
7.3	Vattenutspädning . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Provplan</b>	<b>59</b>
8.1	Bränsleutspädning . . . . .	59
8.1.1	Försök för skapande av förbättrad inflödesmodell . . . . .	59
8.1.2	Försök för att avgöra om en koncentrationsoberoende modell är tillräcklig . . . . .	60
8.1.3	Längre försök för bestämma avdunstningstaktens temperaturberoende . . . . .	60
8.1.4	Försök med förbättrad modell för avdunstat bränsle . . . . .	60
8.2	Oljedegradering . . . . .	61
8.2.1	Laboratorieförsök för att undersöka oljedegraderingens temperaturberoende . . . . .	61
8.2.2	Laboratorieförsök för att undersöka effekten av olika uppvärmningstakt . . . . .	61
8.2.3	Laboratorieförsök för att undersöka oljedegraderingens beroende av blow by . . . . .	62
8.2.4	Laboratorieförsök för att undersöka oljedegraderingens beroende av bränsleutspädning . . . . .	63
8.2.5	Försök i motorprovcell . . . . .	63
8.2.6	Försök med olika oljor . . . . .	64
8.3	Vattenutspädning . . . . .	65
8.3.1	Försök för framtagning av nya data för verifiering av modellen	65
<b>A</b>	<b>Flödesschema för kalibrering av bränsleutspädningsmodellen</b>	<b>67</b>
<b>B</b>	<b>Framtida förbättrad modell</b>	<b>69</b>

<b>C</b>	<b>Flödesschema för skapandet av modell för blandningar av FAME och diesel</b>	<b>75</b>
<b>D</b>	<b>Variabellista</b>	<b>77</b>
D.1	Bränsleutspädning . . . . .	77
D.2	Oljegradering . . . . .	78
D.3	Oljesotbildning . . . . .	78
D.4	Vattenutspädning . . . . .	79
D.5	Temperaturmodeller . . . . .	80
<b>E</b>	<b>Förkortningar</b>	<b>81</b>
	<b>Litteraturförteckning</b>	<b>83</b>





# Kapitel 1

## Inledning

Motoroljans degenerering är normalt det som sätter gränsen för serviceintervallet på en modern lastbil. Det skattas idag som ett schablonvärde utifrån ett antagande om vilken sorts drift motorn kommer att utsättas för, vilket ofta ger ett icke-optimalt serviceintervall. Då motorn körs under mindre slitsamma förhållanden kommer oljan att bytas med tätare intervall än nödvändigt, till en onödigt hög kostnad och med onödigt stor miljöpåverkan. Om motorn istället utsätts för hårdare förhållanden än väntat finns en ökad risk för motorhaverier, vilket medför en ännu högre kostnad.

För att åtgärda dessa problem vill man, istället för att använda schablonvärden, låta bilens styrsystem beräkna lämpliga intervall för oljebyten. Detta skulle kunna ske genom direkta mätningar av oljans kvalitet, men den extra kostnaden för att installera sådan mätutrustning motsvaras i många tillämpningar inte av vinsterna det skulle medföra. Istället bör oljebytesintervallet beräknas utifrån den information som redan finns tillgänglig i styrsystemet. Målet med detta examensarbete är att skapa en modell för hur oljan degenereras som kan användas för att beräkna kvarvarande tid och körsträcka till oljebyte utifrån i styrsystemet tillgängliga storheter.



## Kapitel 2

# Oljans funktion

Motorolja huvuduppgift är att minska friktionen i motorns rörliga delar. En ständigt förnyad oljefilm skapas mellan kolvar och cylinderfoder genom att ny olja pumpas upp från oljesumpen och sprayas på cylinderfodrets nedre del. Därifrån förs oljan upp längs cylinderväggen med hjälp av kolvens oljeringar och fördelas på så sätt över cylinderväggen så att ett oljeskikt skapas på kontaktytorna mellan kolv och cylinder. Då kolven rör sig nedåt skrapar oljeringarna tillbaka oljan ner i oljesumpen och processen upprepas. Oljan smörjer även turboaggregatet och vevhuset för att minska friktion och slitage.

Utöver att minska motorns friktion hjälper oljan också till att kyla motorns komponenter. Den olja som pumpas från oljesumpen till kolvens undersida och till turboaggregatet är betydligt kallare än den ytor den kommer i kontakt med och därmed överförs värme till oljan. Denna kylande effekt är viktig eftersom den sker på delar av motorn där kylvätskan inte kan kyla.

Oljan rengör dessutom motorn genom att den för med sig sot och andra föroreningar bort från cylindrar och vevlager där dom skulle kunna orsaka skador och försämra motorns effektivitet.

En modern motorolja består av en basolja, som kan vara antingen mineralolja eller syntetisk olja och en mängd olika additiv som förbättrar oljans egenskaper. Exempel på additiv är lösningsmedel för att lösa upp föroreningar i motorn, viskositetsförändrare som förbättrar oljans smörjande egenskaper och baser som neutraliserar de syror som oljan utsätts för. Då oljan degenereras förändras både basoljan och tillsatserna och därmed finns det flera faktorer som påverkar när oljan behöver bytas.

## 2.1 Oljans degenerering

### 2.1.1 Oljedegradering

Oljedegradering kan delas upp i två olika förlopp, oxidering och basuttömning. Eftersom oljan är i ständig kontakt med syre, både i oljesumpen och i cylindrarna, kommer oljan oxideras. Oxideringen förkortar oljans kolvätekedjor och skapar reaktiva restprodukter som i sin tur kan reagera med nya oljemolekyler. Då kolvätekedjorna blir kortare, ändras oljans viskositet och därmed försämras dess

smörjegenskaper. Dessutom är flera av restprodukterna sura, vilket också tömmer oljan på baser. Utöver dom syror som bildas som restprodukter vid oljans oxidering innehåller även bränslet syror som kan förorena oljan. Om motorn är utrustad med kyld EGR kommer sura förbränningsgaser att blandas i det vatten som kondenseras i EGR kylaren för att sedan återvända till cylindern. Väl där kommer syrorna antingen att försvinna med avgaserna eller passera kolven som blow by och slutligen hamna i motoroljan. Oljan innehåller ett antal olika baser som en efter en uttöms då dom reagerar med sura föroreningar i oljan. Eftersom försurningsprocesserna är autokatalytiska kommer syrahalten snabbt att stiga i oljan när baserna är uttömda, vilket orsakar korrosivt slitage på motorns delar. Som mått på basuttömning i oljan används två mätvärden, halten syror i oljan, TAN och halten baser, TBN. Båda dessa mäts i ekvivalent mängd kaliumhydroxid i milligram per gram olja [1]. Oljans oxidierungsgrad mäts som OIT, tiden från det att ett oljeprov utsätts för en oxiderande miljö till dess att det visar en kraftigt ökande oxidering vilket tyder på att de tillsatta antioxidanterna slutat verka [1].

### 2.1.2 Bränsleutspädning

En annan orsak till oljans degenerering är utspädning med bränsle, vilket påverkar oljan på flera sätt. För det första är bränslets smörjande egenskaper betydligt sämre än oljans och därmed ökar det mekaniska slitaget på motorn då bränslehalten i oljan ökar. För det andra innehåller bränslet ofta olika sura föreningar vilket bidrar till ökad oxidering och basuttömning. Bränslet tar sig in i oljan under cylinderns expansionsfas. Då bränslet i cylindern antänds ökar trycket i cylindern kraftigt, vilket gör att en viss mängd ännu oförbränt bränsle passerar kolvens tätningssringar tillsammans med blow by-gaserna för att sedan blandas med oljan i oljesumpen. Mängden bränsle som förorenar oljan blir speciellt stor då avgasbehandlingssystemet rengörs genom upphettning. Detta sker genom extra insprutning av bränsle för att höja temperaturen i efterbehandlingssystemet och därmed "bränna" bort föroreningar från filtret. Denna extrainsprutning ligger senare i motorns cykel än den normala bränsleinsprutningen vilket innebär att oljefilmen på cylinderväggarna är mer exponerad. En del av bränslet fastnar då i cylinderväggens oljefilm och förs sedan med ner i oljesumpen. För att förhindra att trycket blir för högt är oljesumpen ventilerad. Luft tas in via motorns luftfilter, passerar genom oljesumpen och förs sedan ut i motorns luftintag. På detta sätt kan bränsle som lösts i oljan dunsta och återföras till cylindern. Bränslehalten i oljan avgörs av förhållandet mellan inflöde och utflöde. Bränsleutspädning har tidigare främst varit ett problem vid korta körningar och låga temperaturer, i övrigt har bränslets avdunstning varit nog för att hålla utspädningen på en låg nivå. Detta håller på att ändras i och med det ökande användandet av biodiesel, med allt högre halter av FAME inblandad i handelsdieseln. Dessa nya bränslen har högre kokpunkter än vanligt diesel och därmed är deras avdunstningstakt ur oljan betydligt lägre, med en ökad utspädning som följd.

## 2.1. OLJANS DEGENERERING

### 2.1.3 Oljesot

Förbränningen i motorn sker aldrig fullt ut. I delar av cylindern kommer det, trots att det globalt råder överskott på syre i en dieselmotor, finnas mer bränsle än syre. I dessa områden kommer det ofullständigt förbrända bränslet bilda sotpartiklar som sedan kan fastna i oljefilmen på cylinderfödret och föras med oljan ner i oljesumpen. Sotpartiklarna påverkar oljans smörjegenskaper på flera sätt. Dels kan sotpartiklarna orsaka mekaniskt slitage på motorns delar då dom följer med oljan. För att motverka detta innehåller motoroljan lösningsmedel för att lösa upp sotet och hålla det flytande i oljan. Även sot som löser sig i oljan påverkar dock oljans egenskaper, bl.a. ger det en ökad viskositet. Detta får till följd att oljans smörjande egenskaper försämras, med ökande motorslitage och bränsleförbrukning som följd. Oljan kan endast lösa en begränsad mängd sot och när denna gräns överskrids bildas ett slamlager av sotblandad olja i oljesumpen. Detta slam förhindrar oljans cirkulation och därmed dess värmeutjämningsförmåga. Därmed blir oljans temperatur ojämn och en ökad termisk degradering sker i områden med förhöjd temperatur.

### 2.1.4 Vattenutspädning

Vatten är en av produkterna då bränsle reagerar med luft i en förbränningsmotor. Den allra största delen vatten förblir i gasform och försvinner direkt ur motorn med avgaserna. En del av vattnet blir dock kvar i motorn för att sedan hamna i motoroljan. Eftersom vattenånga alltid finns bland restgaserna från förbränningen består en del av blow by-gaserna, som tar sig förbi kolven och ner i oljesumpen, av vattenånga. Trots de relativt höga temperaturerna i oljesumpen kondenserar en del av vattnet och blandar sig med oljan. Vatten är dock inte lösligt i olja varför blandningen bildas i form av en emulsion. Denna emulsion har betydligt sämre smörjande egenskaper en ren motorolja och bidrar därför till ett ökat slitage på motorn och till en högre bränsleförbrukning. Mängden vatten i oljesumpen beror av oljans temperatur. Vid oljetemperaturer under vattnets kokpunkt kan vatten ackumuleras i oljesumpen, men då temperaturen närmar sig kokpunkten avdunstar vattnet snabbt. Eftersom oljetemperaturen normalt ligger nära eller över vattnets kokpunkt är denna sorts vattenutspädning främst ett problem vid låga temperaturer och upprepade korta körsträckor. En annan källa till vatten i oljan är kyld EGR. Eftersom avgaserna alltid innehåller vattenånga så kommer även EGR-gaserna att göra det. Då ångan passerar EGR-kylaren kan en del av ångan kondenseras och bilda syror tillsammans med kväveoxider som bildas vid förbränningen. Syrorna följer gaserna tillbaka in i cylindern och kan sedan ta sig förbi kolven och ner i motoroljan. Detta syrablandade vatten tömmer oljan på baser och orsakar korrosiv utslitning av motorns delar. Dessutom försvinner inte problemet då oljetemperaturen stiger eftersom endast vattnet dunstar och lämnar syrorna efter sig. Vid extrema mängder kondens kan cylindern fyllas med så mycket vatten att motorn tar mekanisk skada då vattnet hindrar kolvens rörelse, s.k. vattenslag.



## Kapitel 3

# Litteraturstudie

För att undersöka vilka faktorer som styr de olika oljedegenereringsförloppen och vilka tidigare lösningar som finns för att kontinuerligt modellera oljedegenereringen gjordes en litteraturstudie. Källorna hämtades ur olika patentdatabaser, ur Scantias egna arkiv samt ur SAE:s arkiv.

### 3.1 Tidigare lösningar

Eftersom problemen med schablonvärden för oljebytesintervallet länge varit kända har ett antal lösningar föreslagits. Dom flesta använder mätning av oljetemperaturen som utgångspunkt för att skatta oljans degenereringstakt. Därefter kompenseras den aktuella körsträckan för denna degenereringstakt varefter kvarvarande körsträcka och tid till oljebyte beräknas, t ex Meyerdierks m fl [2].

Andra modeller använder flera mätningar av t ex varvtal, last och bränsleförbrukning som ytterligare indata till en liknande modell [3].

En tredje lösning är att indirekt beräkna oljans egenskaper via en modell för hur dessa inverkar på mätbara storheter som t ex motorns vridmoment och bränsleförbrukning [4].

Modellerna för oljans degenerering är genomgående empiriska och specifika för varje enskild konfiguration.

Ingen tidigare lösning inkluderar en mer detaljerad modell för dom olika mekanismer som orsakar oljedegenerering. En sådan modell skulle vara fördelaktig eftersom den inte skulle behöva så många mätningar för varje specifik installation av motorn. Istället skulle den innehålla ett fåtal variabla parametrar som enklare kunde anpassas till varje konfiguration.

### 3.2 Modeller för oljedegenerering

För att klarlägga vilka faktorer som påverkar de olika degenereringsprocesserna gjordes en sökning efter experimentella studier där dom har undersökts. Som källor användes främst Scantias interna arkiv och SAE:s databas.

### 3.2.1 Bränsleutspädning

Andreae m fl [5] har studerat vilka faktorer som påverkar bränsleutspädningen genom motorförsök där bränslekonzentrationen i oljan har mätts med spektroskopiska metoder och jämförts mellan olika bränslen och driftsförhållanden. Det avgörande för bränsleutspädningen är, enligt deras mätning, insprutningstidpunkten. En sen insprutning ger en ökad mängd bränsle som fastnar i den exponerade oljefilmen på cylinderväggen. Studien fann även en stor skillnad mellan vanligt diesel och diesel med tjugo procent inblandning av biodiesel. Koncentrationen av den tjugoprocentiga biodieselblandningen ökade ca fyrtio procent snabbare än koncentrationen av ren diesel. Skillnaden är alltså stor, även med förhållandevis låg inblandning av biodiesel. Andra faktorer som fanns påverka bränsleutspädningen var luft-/bränsleförhållandet i cylindern, cylindertrycket och motorns varvtal.

Även Belloir m fl [6] har undersökt insprutningstidpunktens inverkan på bränsleutspädningen och stöder Andreaes slutsatser.

Shayler m fl [7],[8], har gjort försök med bränsleutspädning och kommit fram till en empirisk modell. Dom har också undersökt bränslets löslighet i motorolja och funnit att den är starkt temperaturberoende. Försöken gjordes dels med i förväg utspädd olja och dels med olja som späddes ut av motorn. Avdunstningstakten skiljde tydligt mellan dessa två vilket tyder på att bränslesammansättningen i oljan inte är densamma som ursprungsbränslet. En analys av den utspädda oljan visade också att den innehöll en oproportionerligt stor andel av bränslets tyngre komponenter som anrikats i oljan medan de lättare komponenterna dunstat snabbare. I försöket undersöktes även effekten av olika körstilar och en betydande ökning av bränsleutspädningen fanns vid driftsförhållanden som innebär låga oljetemperaturer, som t ex upprepade kallstarter och korta körsträckor.

Sagawa m fl [9] undersökte ett flertal faktorerers inverkan på bränsleutspädningen och ställde upp en mycket enkel modell. Bland de undersökta faktorerna fanns oljetemperaturen, bränslekonsumtionen, bränsleinjektionstidningen och antalet kallstarter av motorn vara avgörande för bränsleutspädningen. Försök gjordes också med serier av olika försöksförhållanden med en resulterande bränsleutspädning motsvarande summan av de olika delförsöken.

### 3.2.2 Oljedegradering

Leet m fl [10], har undersökt om EGR påverkar oljans degraderingstakt och inte funnit något samband. Dessa försök gjordes dock med begränsad kylning av EGR-gaserna och den skadliga effekten kan därför öka om kraftigare kylning används. Normalt kyls gaserna innan dom återförs till motorn, detta minskar deras specifika volym och ökar därmed motorns volumetriska verkningsgrad samtidigt som mängden producerade kväveoxider minskar vid lägre temperatur. Kraftig kylning av gaserna kan ge upphov till surt kondensat i EGR-kylaren som sedan



### 3.2. MODELLER FÖR OLJEDEGENERERING

kan ta sig via cylindern till oljesumpen där det orsakar ökad oljedegradering.

Gao [11], har undersökt oljans viskositet och syrahalt vid olika temperaturer i laboratorium. Oljan utsattes för ett konstant luftflöde vid olika temperaturer under åtta dygn och viskositeten och syrahalten mättes en gång per dygn. Dessutom analyserades den degraderade oljan med spektroskopiska metoder för att undersöka vilken sorts oxidering som skedde. Både viskositeten, och syrahalten visade ett exponentiellt beroende av temperaturen.

#### 3.2.3 Oljesotbildning

Gautam m.fl. [12] har undersökt oljesotets inverkan på mekaniskt slitage med hjälp av en testrigg. Dom fann ett klart samband mellan sothalt i oljan och mekaniskt slitage, antalet gjorda försök var dock för litet för att bestämma det exakta funktionella beroendet. Dom undersökte även effekten av lösningsmedel, men fann endast en svag positiv effekt.

Enligt Leif Hansson, NMED [13] är tidpunkten för bränsleinsprutning relativt kolvens rörelse det avgörande för sotbildningen i oljan. Vid sen insprutning är en större del av cylinderväggens oljefilm exponerad och en större andel av det bildade sotet kommer att fastna där. Sottillväxten som funktion av insprutningstidpunkten mäts redan idag upp för varje ny motor och därur kan den totala sotmängden i oljan enkelt beräknas.

#### 3.2.4 Vattenutspädning

Girard m.fl. [14] har studerat EGR-kondensat och dess innehåll av olika svavelföreningar. Dom fann att lägre temperatur gav högre kondensatflöden, men att flödet av svavelföreningar istället minskade med minskad temperatur. Detta förklaras av att lägre temperaturer ger en annan fördelning av svavelföreningar som är mindre benägen att kondensera.

Hoard m.fl. [15] har bl.a. studerat kondens i EGR-kylare och har funnit ett beroende på kylargeometrin. Ett antal olika kylargeometrier har studerats och kondensatflödet har funnits vara större för geometrier med stora temperaturvariationer och låga lokala temperaturer.

Bourgoin m.fl. [16] har undersökt vilka faktorer som påverkar mängden kondensat. I försöken gjordes statiska motorprov med olika varvtal och BMEP medan kondensat samlades in. Dom avgörande faktorerna för mängden kondensat fanns vara avgasernas vatteninnehåll, temperaturskillnaden över EGR-kylaren och andelen avgaser som återcirkuleras.

### 3.2.5 Sammanfattning av litteraturstudien

#### Bränsleutspädning

Det finns många faktorer som påverkar oljans bränsleutspädning. I litteraturen nämns dels motorberoende parametrar som insprutningstidpunkt och cylindertryck, dels externa parametrar som bränsle- och oljesammansättning men framförallt körstilsberoende parametrar som oljetemperatur, bränslekonsumtion och varvtal. Beroendet av körstil ger stora fördelar för en bränsleutspädningsmodell beroende av realtidsparametrar framför schablonvärden då de senare inte kan ta hänsyn till förändrat beteende hos föraren.

#### Oljedegradering

Degraderingen är ett mycket komplicerat förlopp som beror av ett stort antal faktorer. Flera olika degraderingsprocesser sker parallellt, i vissa fall kan oxideringen vara det avgörande, i andra fall basuttömningen eller viskositetsförändringen. Gemensamt för alla dessa processer är dock att dom är exponentiellt beroende av oljetemperaturen som är avgörande för oljans degradering.

#### Oljesotbildning

Det avgörande för sotbildningen i oljan är insprutningstidpunkten, ju senare insprutning desto högre sotbildningstakt. Givet en känd insprutningstidpunkt kan empiriska sotbildningskurvor användas för att beräkna den totala sotbildningen.

#### Vattenutspädning

Större delen av litteraturen fokuserar på vatten från kondens i EGR-slingan. Detta är det mest skadliga för motorn eftersom EGR-gaserna innehåller sura föreningar som bidrar till oljedegradering. Mängden kondensat beror av vatteninnehållet i avgaserna, temperaturskillnaden över EGR-kylningen och kylarens geometri.

# Kapitel 4

## Modellering

### 4.1 Bränsleutspädning

#### 4.1.1 Inledning

Modelleringsprocessen för bränsleutspädningen har utgått från en modell för bränsleavdunstning ur litteraturen [7] varefter olika modifieringsförsök har gjorts och resultaten jämförts med mätdata. Modellen för avdunstningen kombineras sedan med ett empiriskt genomsnittsinflöde av bränsle för att beräkna bränslehalten i oljan.

Bränslehalten i motoroljan avgörs av förhållandet mellan hastigheten med vilken bränsle avdunstar från oljesumpen och hastigheten med vilken det strömmar in. Avdunstningen är en kontinuerlig process medan inflödet sker punktvis och kan variera mycket mellan olika motorer.

Moderna motorer tillverkas för att kunna användas med höga halter FAME i bränslet. Eftersom FAME har väldigt hög kokpunkt och därmed dunstar långsamt från oljesumpen är motorerna byggda så att inströmningen av bränsle i oljan är mycket låg under normal drift. Det främsta inflödet av bränsle i motoroljan sker istället vid rengöring av efterbehandlingssystemet då insprutning av bränsle sent i motorns cykel exponerar stora delar av cylinderväggen för bränslesprayen.

Bränsleutspädningsmodellen kommer därför att anta att inflödet är försumbart förutom under regenerering och använda ett känt genomsnittsinflöde under regenerering, kombinerat med en kontinuerlig modell för bränslets avdunstning. Eftersom bränsleflödet under regenerering kan variera vore det bättre att ha en bränsleinflödesmodell baserad på mängden insprutat bränsle och vid vilken vevaxelvinkel insprutningen har skett. I nuläget finns dock inga data tillgängliga för att undersöka detta och det kommer därmed inte att ingå i examensarbetet annat än som förslag på vidare arbete.

#### 4.1.2 Modellbeskrivning

Modellens uttryck för avdunstningstakten beror av den aktuella halten bränsle i oljan, oljans temperatur och andelen bränsle som har avdunstat enligt följande ekvation,

$$\frac{dm_{Bransle}}{dt} = \frac{A(T - T_{ref})}{1 + Bx + Cx^2} \cdot \frac{m_{Bransle}}{m_{tot}} \quad (4.1)$$

där  $m_{Bransle}$  är mängden bränsle i oljan,  $A$ ,  $B$  och  $C$  är modellparametrar  $T$  är oljetemperaturen i oljesumpen,  $T_{ref}$  är en referenstemperatur,  $x$  är andelen bränsle som har avdunstat och  $m_{tot}$  är den totala mängden olja och bränsle. Avdunstningstakten kommer dessutom att bero av motorspecifika parametrar som t.ex. oljesumpen och cylindrarnas geometri vilka inte explicit ingår i modellen. För att indirekt ta hänsyn till dessa effekter kommer modellens parametrar kalibreras separat för varje motortyp.

I försöken som användes för att verifiera modellen var oljan på förväg utspädd med bränsle medan bränslet gradvis kommer att flöda in under verklig drift. Detta gör att andelen dunstat bränsle blir mer komplicerad att beräkna. Ett sätt att lösa problemet är att dela upp den totala mängden bränsle i små element svarandes mot inflödet under en viss tid, t ex modellens uppdateringsintervall  $\Delta t$ . Varje element får en egen massa och andel avdunstat bränsle. Fördelen med detta skulle vara att förutsättningarna för modellen skulle vara desamma som under verifieringen. Denna lösning medför dock en del beräkningsmässiga problem eftersom antalet bränsleelement och därmed mängden minne som krävs, snabbt växer sig mycket stor.

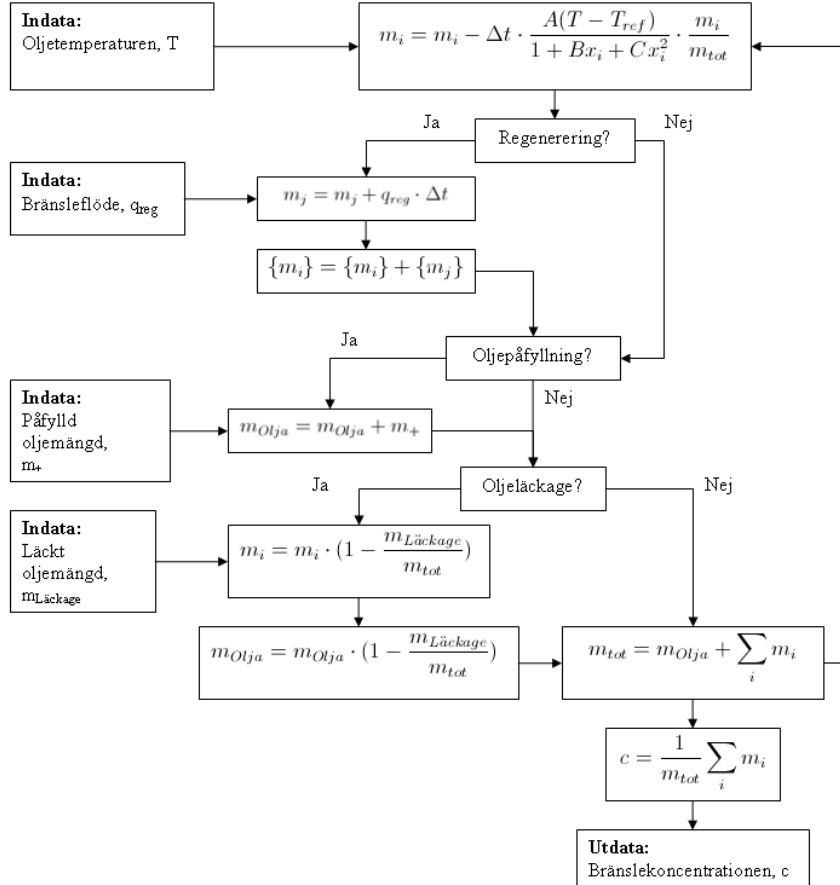
Ett alternativ som vore bättre ur beräkningssynpunkt är att använda en genomsnittlig andel avdunstat bränsle. Detta bör vara en bra approximation om bränslet kontinuerligt tillförs oljan och dess sammansättning i oljan därmed bör kunna approximeras med genomsnittsvärdet över allt bränsle. Det är dock tveksamt om denna approximation duger vid ett mer spritt inflöde. Mellan regenereringarna, då inget inflöde sker, kommer bränslets sammansättning hinna ändras tillräckligt mycket för att den blandade modellen inte längre ska vara en bra approximation.

För att dra nytta av båda dessa lösningars fördelar kommer modellen att använda ett mellanting. Under varje regenerering antas allt bränsle ha samma sammansättning och avdunstningstakten beräknas med hjälp av medelvärden för avdunstade bränsleandelar. Då regenereringen är färdig räknas den inkomna mängden bränsle ihop och betraktas därefter som ett bränsleelement med en egen massa och andel avdunstat bränsle.

I tillämpningar med kort tid mellan regenereringar, som t ex stadsbussar, kommer denna metod att ge ett stort antal bränsleelement. Samtidigt har denna sorts tillämpningar den kortaste tiden mellan oljebyten, varför minnesåtgången bör kunna hållas inom rimliga gränser. För att ytterligare begränsa modellens minnesåtgång kan bränsleelement vars bränsleinnehåll sjunkit under ett visst gränsvärde och vilkas sammansättning därmed kan antas vara approximativt konstant, samlas ihop till ett enda bränsleelement.

#### 4.1. BRÄNSLEUTSPÄDNING

Modellen beräknar bränslehalten enligt följande,



Figur 1: Beskrivning av modellen för bränsleutspädning. Masselementen  $m_i$  avdunstar enligt den diskretiserade differentialekvationen i figurens övre del. Nya bränsleelement  $m_j$  tillförs till mängden bränsleelement i figurens mittparti då regenerering sker. Om ny olja fylls på eller läcker ut uppdateras den aktuella totalmassan olja,  $m_{Olja}$  och masselementen  $m_i$  som sedan används i figurens nedre del för att beräkna bränslekoncentrationen.

Där  $q_{reg}$  är bränsleflödet in i oljesumpen under regenerering,  $m_{tot}$  är den totala massan av olja och bränsle i sumpen,  $A$ ,  $B$  och  $C$  är parametrar som anpassas för att överrensstämma med mätdata,  $c$  är den aktuella bränslekoncentrationen,  $T$  är den aktuella temperaturen i oljesumpen,  $T_{ref}$  är en referenstemperatur,  $x_i$  är andelen av bränsleelement  $i$  som har dunstat och  $\Delta t$  är tiden mellan varje uppdatering av den beräknade bränslekoncentrationen.

Under normal körning uppdaterar modellen den aktuella bränslemängden svarande mot varje bränsleelement,  $m_i$  och summerar dessa för att beräkna den totala bränslemängden varefter processen itereras. Då efterbehandlingssystemet regenereras skapas ett nytt bränsleelement,  $m_j$  som läggs till mängden av tidigare bränsleelement. Om modellen detekterar en oljepåfyllning eller ett oljeläckage så

kompenseras olje- och bränslemängden för detta.

Differentialekvationen (4.1) löses i diagrammet ovan med Eulers metod. Denna metod har fördelen att den kräver lite datorresurser. Samtidigt ger den lösningar med dålig noggrannhet om bränslets avdunstningstakt varierar snabbt. Eftersom det avgörande för avdunstningstakten är temperaturen i oljesumpen, som varierar relativt långsamt finns det anledning att tro att denna lösningsmetod kommer att ge tillräcklig noggrannhet, även om relativt långa tider  $\Delta t$  väljs.

Beräkning av bränsleinflödet och förändring av oljemängden kan göras mer sällan. Inflödet är än så länge helt linjärt under regenereringen och det räcker därmed att det beräknas en gång per regenerering.

Ökad oljemängd genom påfyllning kan betraktas som ett momentant förlopp eftersom det sker då motorn är avstängd, alltså räcker det att beräkna detta en gång per detekterad oljepåfyllning.

Beräkning av oljeläckage är något mer komplicerat då läckage kan förekomma på flera ställen i motorn och därmed styrs av väldigt varierande faktorer. Det är dock rimligt att anta att förloppet är någorlunda stabilt och att det därmed går att använda långa intervall mellan beräkningarna.

Som startvillkor till modellen antas det att ny olja är helt fri från förorenande bränsle.

### 4.1.3 Kalibrering

Modellen kalibreras med hjälp av avkokningsförsök. Avkokningen görs för några olika temperaturer och modellens parametrar justeras så att maximal överensstämmelse mellan modellerade och uppmätta bränslekoncentrationer uppnås. Efter varje ändring som kan antas innebära en betydande ändring av avdunstningsflödet måste modellen kalibreras genom nya avkokningsförsök.

Även modellen för tillflödet bör uppdateras då motorn ändras. Faktorer som påverkar bränsleinflödet är t.ex. bränsleinsprutningens spridarvinkel, som påverkar hur mycket bränsle som fastnar i oljefilmerna på cylinderväggarna, och toppringens position, som avgör hur mycket bränsle som kan samlas i utrymmet mellan toppringen och kolvens överkant.

I nuläget använder modellen det genomsnittliga bränsleinflödet under regenerering. Då modellen kalibreras om måste detta genomsnittsflöde mätas på nytt. Med tillgång till relevanta mätdata bör det vara möjligt att skapa en bättre inflödesmodell, baserad på insprutningsmängd och insprutningsvinkel. En sådan modell kommer inte att behöva kalibreras för varje effektsteg då bränsleinflödet direkt avgörs av motorns geometri.

En beskrivning av kalibreringsprocessen finns i bilaga A.

Bränsleutspädningen påverkas dessutom av vilken sorts bränsle som används.

Modellen skapades med mätvärden för hundraprocentig FAME vilket gör att den för mer lättflyktiga bränslen kommer att överskatta bränslehalten.

Avkokningsförsök kommer att göras med ren diesel och med olika blandningar [33]. Med hjälp av dessa borde det vara möjligt att ändra modellen, så att den kan modellera olika halter av FAME.

#### 4.1. BRÄNSLEUTSPÄDNING

Då lämpliga parametervärden till avdunstningsmodellen är kända för ren diesel respektive ren FAME bör halten blandat bränsle i oljan kunna beräknas som det viktade medelvärdet mellan resultatet från FAME- respektive dieselmodellen. En sådan modell bortser från att avdunstningstakterna för de två delsystemen kan påverka varandra men bör åtminstone kunna vara en lämplig utgångspunkt för vidare utveckling om den inte i sig överrensstämmer med försöksresultaten från avkokningen av det blandade bränslet.

Processen för att ta fram en sådan modell finns beskriven i avsnittet ”Förslag på vidare arbete” och ett flödesschema för dom försök som krävs finns i bilaga C.

##### 4.1.4 Mätdata

Tillgängliga data för bränsleinflödet är mycket begränsade. De data som finns kommer från ett försök som bland annat studerade bränslehalten i motoroljan vid regenerering [17]. Då själva flödet inte mättes kan det endast uppskattas indirekt ur bränslekonzentrationen. Under försöket styrdes kylvätsketemperaturen mot 80°C men under en del av försöket sänktes temperaturen oavsiktligt till 40°C med en kraftigt ökad bränslehalt som följd. Vid en så låg temperatur avdunstar bränslet mycket långsamt och det totala inflödet under denna tid kan approximativt beräknas genom att avdunstningen helt försummas.

Försöket kördes dock en väldigt kort tid vid denna lägre temperatur och endast två mätpunkter finns tillgängliga varför osäkerheten i detta inflöde måste anses stor. Dessutom är försöket endast gjort för en motorkonfiguration med en viss mängd insprutat bränsle per regenerering.

För att få högre noggrannhet i bränsleutspädningsmodellen bör därför fler försök göras, helst med direkt mätning av bränsleinflödet, för ett antal olika motorer och driftsförhållanden under en längre tid.

För bränslets avdunstning finns betydligt bättre mätningar tillgängliga. NMBO har gjort ett antal försök med bränsleavkokning i provcell [18]. Oljan späddes på förväg ut med bränsle varefter motorn kördes mellan 70 och 115 timmar medan bränslehalten kontinuerligt mättes. Dessa data har jämförts med modellen för bränsleavdunstning och visat god överrensstämmelse.

Än så länge finns endast data tillgängliga för en motorkonfiguration och ett bränsle. Försök med fler sorters bränsle ska göras men i nuläget finns inga planer på att göra om mätningarna med andra motorer. Modellen tar visserligen ingen direkt hänsyn till motorspecifika parametrar, men dessa kommer antagligen att påverka dom optimala värdena på modellens konstanter. Skillnader i t.ex. gasflöden och geometri mellan olika motorer kommer att påverka, även om de inte explicit ingår i modellen.

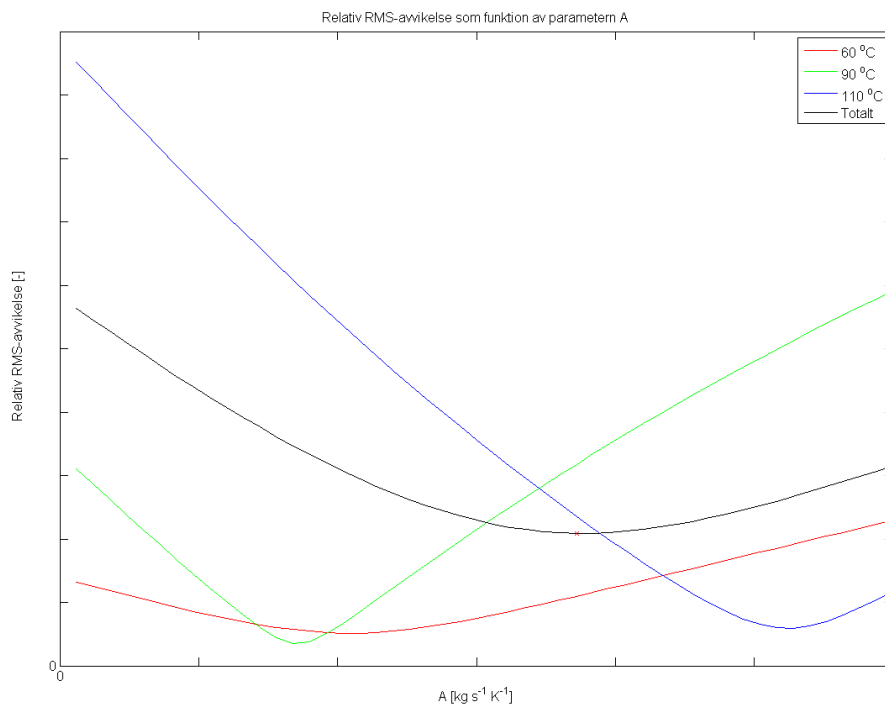
##### 4.1.5 Resultat

Modellen har jämförts med tillgängliga mätdata och gav en god överrensstämmelse. För att kvantifiera avvikelserna valdes det relativa kvadratiske medelfelet (i fortsättningen kallat rms-fel),

$$\Delta_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{c_{sim,i} - c_{matt,i}}{c_{matt,i}} \right)^2} \quad (4.2)$$

där  $c_{sim,i}$  är simulerade bränslehalter svarandes mot de uppmätta bränslehalterna,  $c_{matt,i}$ . Detta är ett, i litteraturen, ofta förekommande felmått som ger en uppfattning om den genomsnittliga avvikelsen. Användandet av relativa fel tillåter jämförelser mellan olika mätserier trots att koncentrationerna varierat från en mätserie till en annan.

Figuren nedan visar hur modellens avvikelse från mätvärdena beror av modellparametern A:



Figur 2: Beräknade bränslehalters relativa avvikelse från uppmätta halter, som funktion av parametern A. Det optimala värdet på parametern A varierar något mellan dom olika försöken, störst avvikelse fås för 90°C kylvätska och minst fås för 60°C kylvätska.

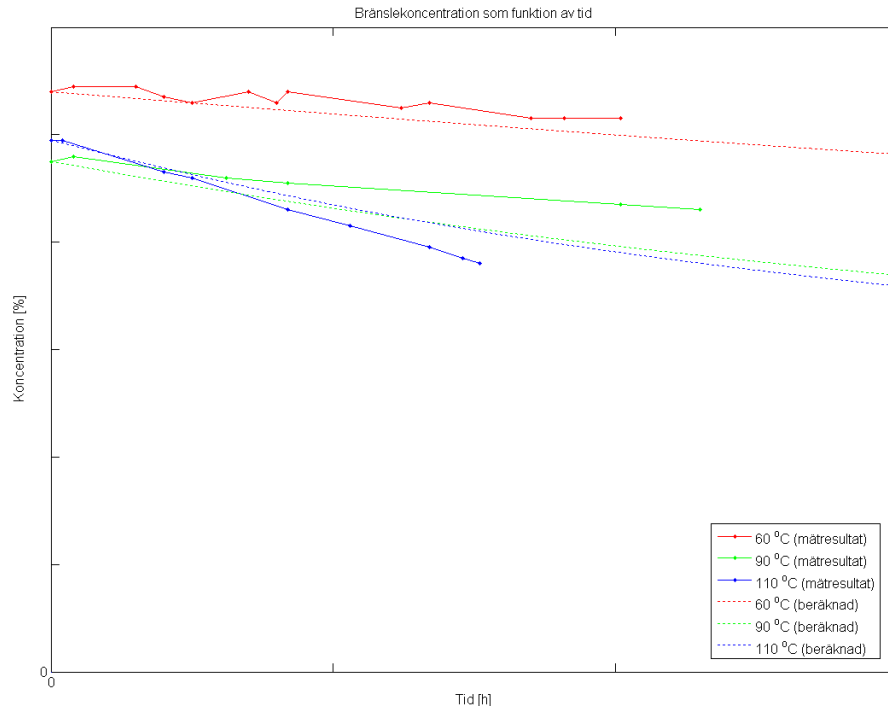
Under optimeringen av modellens parametrar konstaterades att parametern A hade större inverkan på resultatet än dom övriga två parametrarna. En förändring av parametern A med 50 % från sitt optimalvärde gav en ökning av avvikelsen med ca 40 %, motsvarande förskjutning av parametrarna B och C från sina respektive optimalvärden gav endast ca 20 % ökning för parameter C och en ökning av ca 3 % för parameter B.

Optimeringsstrategin som användes var därför att utgå från föreslagna värden på parametrarna B och C och därefter minimera felet genom att variera parametern A enligt figuren ovan. För att hitta ett ungefärligt värde på parametern A att använda som utgångspunkt beräknades det värde som skulle balansera in- och utflöde av bränsle vid uppmätta jämviktsskoncentrationer bränsle.



#### 4.1. BRÄNSLEUTSPÄDNING

Beräknade och uppmätta bränslekonzentrationer kan ses i figuren nedan,



Figur 3: Beräknad och uppmätt bränsleutspädning i procent, som funktion av tiden i timmar för tre olika kylvätsketemperaturer. Det är tydligt att avvikelsen, i enlighet med Figur 2, är störst för kylvätsketemperaturen 90°C. Det kan även konstateras att skillnaden mellan exponentiell och linjärt avtagande bränslekonzentrationer inte går att säkerställa för så korta mätningar.

#### Alternativa modeller

I modellen som användes som utgångspunkt antogs avdunstningstakten vara direkt proportionell mot temperaturen. I litteraturen [19],[20] förekommer även andra temperaturberoenden och därför prövades tre olika,

Funktionellt temperaturberoende	Minimal relativ avvikelse från mätdata
$\frac{dc}{dT} \sim T$	Låg
$\frac{dc}{dT} \sim \exp(T)$	Ca 50 % högre
$\frac{dc}{dT} \sim \sqrt{T}$	Ytterligare ca 15 % högre

Tabell 1: Överrensstämmelse mellan modell och mätdata för olika funktionella beroenden av temperaturen

Det bästa resultatet uppnåddes med ett linjärt temperaturberoende men skillnaden mot övriga alternativ är inte alltför stor (då den bästa överrensstämmelsen var väldigt god är ca 65 % sämre överrensstämmelse inte

heller särskilt illa), trots att dom beskriver ett helt annat funktionellt beroende av temperaturen.

Försök gjordes även med två olika värden på bränslekoncentrationens exponent. I modellen som användes som utgångspunkt var avdunstningstakten proportionell mot koncentrationen upphöjt till 1,1. Denna modell var dock skapad endast genom anpassning till mätdata och författarna hade ingen förklaring till varför exponenten borde vara högre än 1. För att undersöka detta gjordes även försök med exponenten 1 med följande resultat,

Funktionellt temperaturberoende	Minimal relativ avvikelse från mätdata
$c^{1.0}$	Låg
$c^{1.1}$	I princip identisk med ovanstående

Tabell 2: Överrensstämmelse mellan modell och mätdata för olika exponentiella beroenden av bränslekoncentrationen

Skillnaden mellan dom två exponenterna är mycket liten i jämförelse med osäkerheten i modellen och det är därför oklart vilken exponent som bäst beskriver bränsleavdunstningen. Vid implementering i styrsystemet är exponenten ett att föredra eftersom den ger snabbare beräkningar. Eftersom det inte finns några fysikaliska skäl att välja något annat värde för exponenten valdes detta värde för modelleringen.

#### 4.1.6 Diskussion

Ur jämförelsen mellan beräknade och mätta bränslekoncentrationer i Figur 3 kan man konstatera att bränslekoncentrationens avtagande under försöken varit nära linjärt. En trolig förklaring till detta är att avdunstningstakten har begränsats av något annat än bränslekoncentrationen i oljan, som t.ex. den exponerade oljeyta från vilken bränslet kan avdunsta.

Detta antyder att en modell som inte beror av bränslekoncentrationen, skulle kunna vara tillräcklig för att beräkna avdunstningsflödet vilket skulle vara mycket fördelaktigt ur beräkningssynpunkt. För att bekräfta detta behövs längre avkokningsförsök. Om försöken görs lika långa som ett normalt oljebytesintervall skulle man med säkerhet kunna avgöra om en sådan modell vore tillräcklig.

I tabell ett ses att skillnaden mellan olika funktionella beroenden av temperaturen är små i jämförelse med modellens totala avvikelse från mätdata. Detta visar på svårigheten i att konstruera en modell utifrån ett fåtal mätdata. Genom anpassning av dom ingående parametrarna kan väldigt skiljda modeller ge liknande resultat.

För att säkert kunna verifieras måste modellen jämföras med en större mängd mätdata vilket skulle ge ett tydligare besked om vilket temperaturberoende som är det korrekta och ge bättre värden på modellens parametrar. En större mängd data skulle dessutom ge en bättre uppfattning om hur tillförlitlig modellen är.

#### 4.1. BRÄNSLEUTSPÄDNING

Modellen har visat god överensstämmelse med mätdata för försök i provcell. Därmed är det inte säkert att den även kommer att ge bra resultat vid verkliga förhållanden.

Då oljan befinner sig i en lastbil på väg kommer lastbilens rörelser att skapa en oljefilm på oljesumpens insida. Detta kommer att öka oljans kontaktyta mot luften och därmed är det möjligt att även avdunstningstakten ökar.

Eftersom lastbilens rörelser kommer att variera kraftigt mellan olika driftsförhållanden är det omöjligt att inkludera dessa i en enkel modell. Så länge denna effekt endast ökar avdunstningstakten kommer den här föreslagna modellen fortfarande att kunna användas som en övre gräns för bränsleutspädningen och därmed kommer den fortfarande kunna vara användbar.

## 4.2 Oljedegradering

### 4.2.1 Inledning

Oljedegradering är ett komplicerat förlopp som påverkas av många olika faktorer. Den främsta är mängden syror som oljan utsätts för, mängden mekaniskt slitage på oljan från motorns rörliga delar och oljans temperatur. Oljan degraderas genom flera olika processer som pågår parallellt. Varje process beror inte nödvändigtvis av samma faktorer på samma sätt och dessutom är det troligt att dom växelverkar. En del av processerna är autokatalytiska, andra katalyseras av metallrester i oljan och beror därmed på hur mycket slitage motorn utsätts för och vilka material den består av [35]. Dessutom kan bränsle som späds in i oljan påverka degraderingsprocesserna och oljedegraderingsmodellen bör därmed bero av bränsleutspädningsmodellen och vilket bränsle som används [25],[26].

Med tanke på detta skulle det vara orealistiskt att skapa en detaljerad modell av oljans degradering. För att ge bra resultat skulle en sådan modell behöva vara alldeles för komplicerad för att kunna implementeras i styrsystemet och den skulle behöva alldeles för många indata och parametrar för att kunna kalibreras på ett tillräckligt enkelt sätt. Modelleringsstrategin har därför varit att börja från en enkel modell för att sedan eventuellt göra den mer komplicerad om det visat sig möjligt och nödvändigt.

Enligt flera studier [21],[22] är temperaturen avgörande för degraderingstakten. Temperaturen bör vara viktig för alla degraderingsprocesser, då den generellt är avgörande för kemiska reaktioners hastighet och den är dessutom relativt lätt att mäta eller modellera.

Sammantaget gör detta en temperaturbaserad modell till en rimlig utgångspunkt för modellering av oljedegradering.

### 4.2.2 Modellbeskrivning

Oljans degraderingstakt antas i modellen endast vara beroende av oljetemperaturen och temperaturberoendet antas följa Arrhenius ekvation. Motorn delas in i tre zoner, oljesump, turboaggregat och kolvkyllning, i resten av oljeflödet antas oljetemperaturen vara densamma som i oljesumpen. Oljans degraderingstakt,  $D$ , beräknas enligt:

$$D = k_{prop} \sum_i (m_i \cdot e^{-k_{exp}/T_i}) \quad (4.3)$$

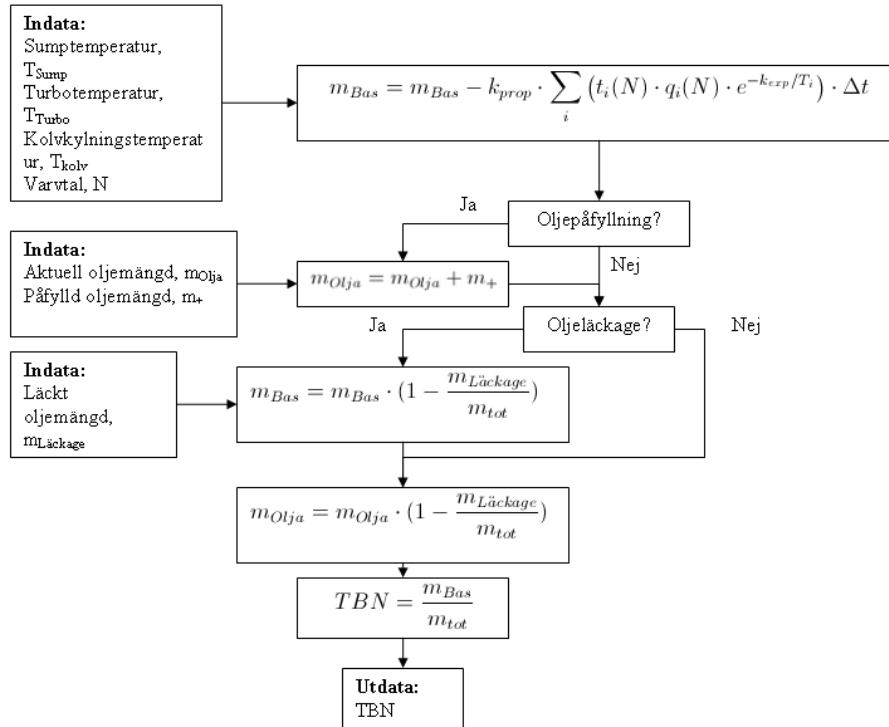
där indexet  $i$  svarar mot oljesumpen, turboaggregatet och kolvkyllningen och där  $m_i$  och  $T_i$  är oljemängden respektive temperaturen i varje zon.

Modellparametrarna  $k_{prop}$  och  $k_{exp}$  antas ha samma värde i alla motorns zoner. Detta antagande är rimligt i en modell där degraderingstakten endast beror på temperaturen. I en mer realistisk modell kan man anta att oljans degradering även påverkas av hur uppvärmningen sker, vilket skiljer mellan dom olika zonerna. Oljesumpens temperatur ändras t ex förhållandevis långsamt över tiden medan oljetemperaturen vid kolvkyllning stiger kraftigt på mycket kort tid, då den förhållandevis kalla oljan kommer i kontakt med den betydligt varmare kolven. En mer avancerad modell borde kunna ta hänsyn till dessa effekter, t.ex. genom

## 4.2. OLJEDEGRADERING

att använda olika parametrar  $k_{prop}$  och  $k_{exp}$  för dom olika zonerna. En sådan modell skulle dock kräva fler mätdata för att verifiera men skulle kunna vara ett rimligt nästa steg för att förbättra modellen.

Modellen beräknar oljedegraderingen enligt följande,



Figur 4: Beskrivning av modellen för oljedegradering. Förändring av basmängden beräknas med den diskretiserade differentialekvationen (3) där  $q_i$  och  $t_i$  är oljeflödet respektive den genomsnittliga uppehållstiden i motorns olika zoner, båda kända utifrån varvtalet,  $N$ . I figurens nedre del kompenseras oljemängden och mängden baser för eventuell påfylld oljemängd,  $m_+$  eller läckt oljemängd  $m_{Läckage}$ .

### 4.2.3 Kalibrering

Degraderingsmodellen har inget explicit motorberoende och behöver därmed inte kalibreras för olika motorer.

Kalibrering kan däremot komma att behövas om modellen utvecklas med olika konstanter  $k_{prop}$  och  $k_{exp}$  för dom olika zonerna enligt avsnittet "Förslag på vidare arbete". En sådan modell skulle behöva kalibreras genom provcellsförsök där dom i modellen ingående temperaturerna och oljedegraderingen mäts varefter modellparametrarna justeras så att överensstämmelsen mellan modellerad och mätt degradering maximeras.

#### 4.2.4 Mätdata

För att undersöka modellen användes data från en serie försök som gjorts i motorprovcell i syfte att studera hur höga oljetemperaturer påverkar oljedegraderingen [24]. Under försöken mättes oljetemperaturen och ett flertal andra parametrar kontinuerligt medan oljeprov togs ungefär var tjugonde timme. Försöken var dock inte specifikt gjorda för att undersöka hur degradingen beror av temperaturen och ett flertal försök är därför gjorda vid en och samma temperatur. Dessutom jämfördes två olika oljor, en normal olja (LOP) och en olja med extra oxidationsbegränsande tillsatser (HOP). Resultaten för dessa två oljor skiljer sig tydligt åt och jämförelser mellan dem två är därför inte möjliga. Detta visar på att modellens parametervärden kommer att bero av vilken olja som används.

Ur analyser av oljeprovorna som togs kan olika oljekvalitetsindikatorer läsas ut. I analyserna användes, TAN, TBN, oxidationsgrad och oljans viskositet vid  $40^{\circ}\text{C}$  respektive  $100^{\circ}\text{C}$ .

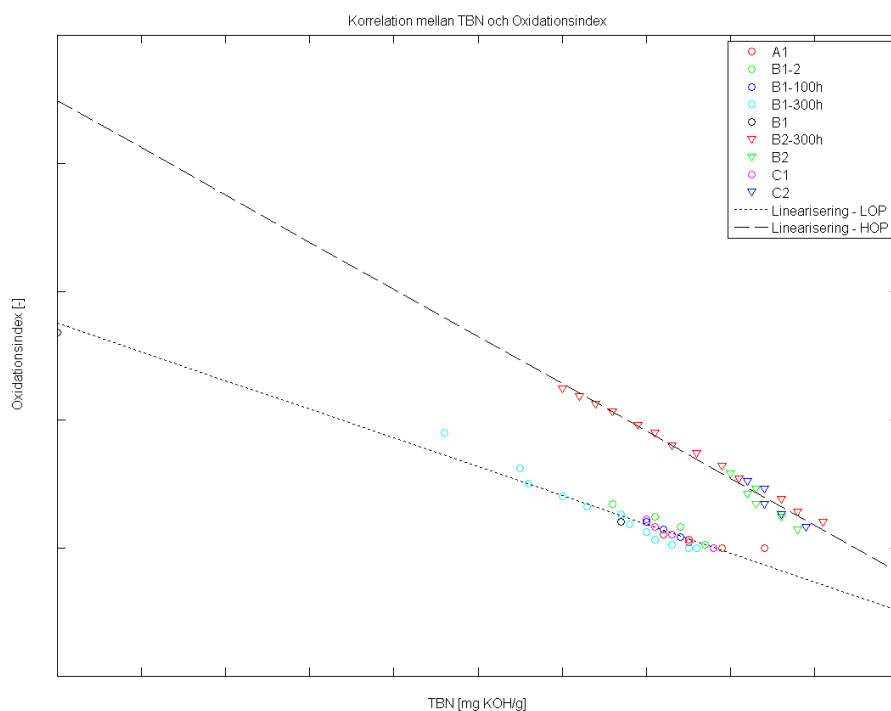
Mätdata för TAN visade sig dock vara oanvändbara eftersom mätutrustningen endast kunnat detektera någon ökning för dem två längsta försöken. Av dessa var ett gjort med LOP-olja och ett med HOP-olja vilket innebär att inga slutsatser kunde dras.

En modell för viskositeten kunde inte heller verifieras med tillgängliga mätningar. Mätdata fanns för samtliga körningar, men skillnaderna dem emellan var för små för att med någon rimlig säkerhet kunna verifiera modellen.

Eftersom mätvärdena för TAN och viskositet visade sig oanvändbara fokuserades modelleringen på TBN och oxidationsindex.

För dem aktuella oljorna visade det sig att TBN korrelerar med oxidationsgraden och det är därför tillräckligt att modellera en av dem två. Eftersom TBN är den mest använda kvalitetsindikatorn valdes att modellera denna. Detta är dock inget generellt samband, och den slutgiltiga modellen kommer att behöva modellera TBN och oxidationsgrad separat.

## 4.2. OLJEDEGRADERING

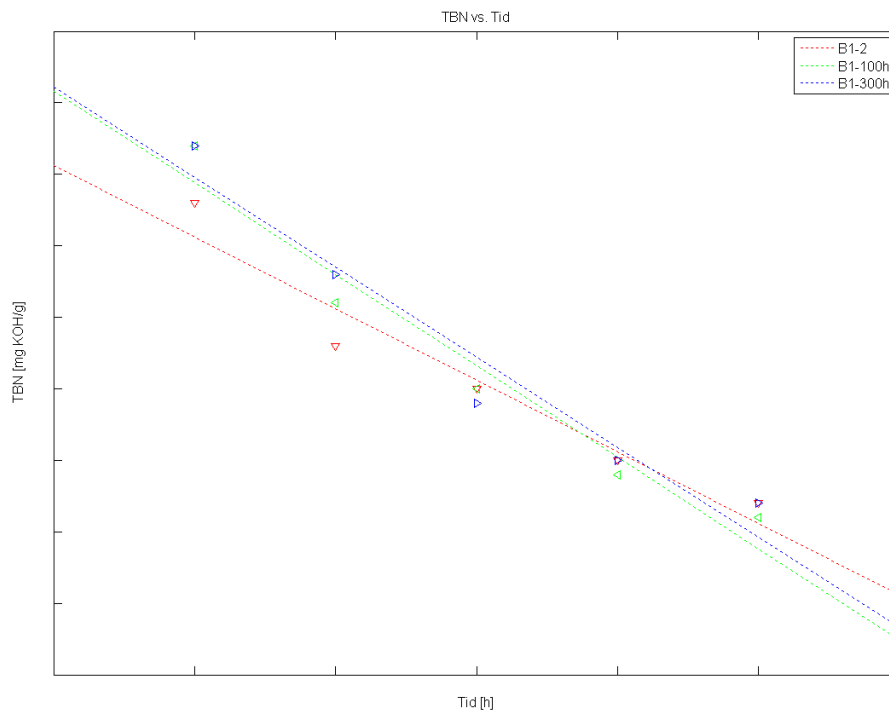


Figur 5: Korrelation mellan TBN och Oxidationsindex för LOP- resp. HOP-olja. Det är tydligt att TBN och Oxidationsindex är nära kopplade för dom aktuella oljorna och att det därmed är tillräckligt att modellera den ena för att verifiera modellen.

Totalt nio försök gjordes varav tre med oxidationsförbättrad olja och sex med normal olja. Dom tre försöken med oxidationsförbättrad olja är mycket lika sinsemellan. Eftersom endast tre sådana försök gjordes och dom inte kan jämföras med övriga försök är dom inte särskilt användbara för degraderingsmodelleringen.

Temperaturer och degraderingstakter för övriga försök kan ses i tabellen nedan. Försök A1 är ett referensförsök, med normala oljetemperaturer. I försök B1 har mycket höga oljetemperaturer uppnåtts genom att oljekylaren har kopplats bort. Försök B1-100h, B1-2 och B1-300h är identiska förutom deras varaktighet, gjorda med höga temperaturer genom bortkopplad oljekylare. Försök C1 är även det gjort med höga temperaturer genom bortkopplad oljekylare men med ett högre kolvkylningsflöde jämfört med övriga försök.

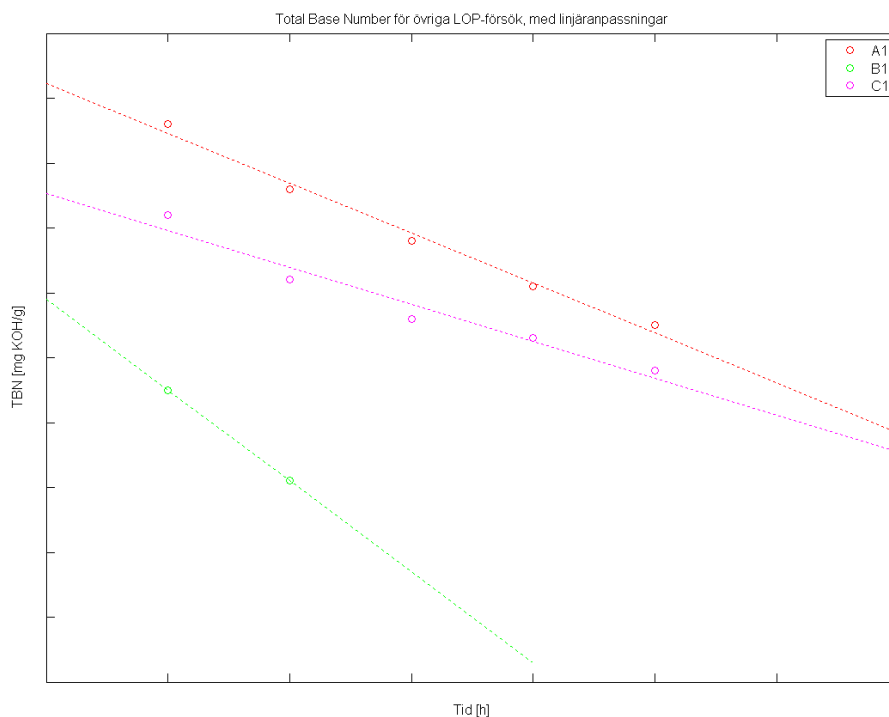
Degraderingen för dom tre likvärdiga försöken kan ses i figuren nedan. Trots att förhållandena var lika varierar degraderingstakten med ca 30 procent, vilket visar på att repeterbarheten i försöken är dålig. För att undvika detta bör framtida försök i möjligaste mån separera effekterna av dom olika faktorer som påverkar oljedegraderingen. Förslag på hur detta kan åstadkommas ges i avsnittet "Förslag till vidare arbete".



*Figur 6: TBN med linjäranpassningar för dom tre försök som borde ha givit identiska resultat. Det är tydligt att degraderingstakterna skiljer mellan dom olika försöken, trots identiska förutsättningar. Nedan ses degraderingstakterna för övriga försök. För försök B1 fanns endast två mätpunkter eftersom provtagningen fick avbrytas i förtid för att förhindra ett motorhaveri.*

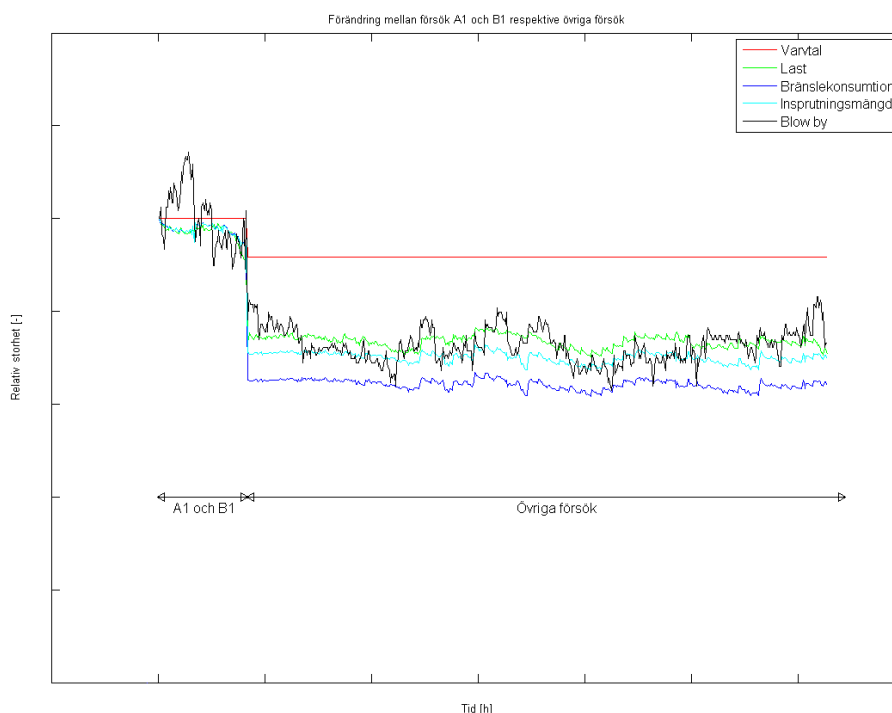


## 4.2. OLJEDEGRADERING



Figur 7: TBN för övriga LOP-försök med linjäranpassningar. Det kan ses att degraderingstakten för försök B1 som väntat var klart högre än för övriga försök. Det kan även konstateras att degraderingstakten för försök A1 var den näst högsta, vilket motsäger modellen eftersom detta försök höll den lägsta temperaturen.

Försök B1, med den högsta temperaturen, gav som väntat den snabbaste degraderingen. Vad som inte var väntat var den höga degraderingstakten för referensförsöket, som hade lägst temperaturer. Degraderingstakten för detta försök var trots låga temperaturer den näst högsta av alla försöken. Den troliga förklaringen är att andra faktorer har varit varierat mellan försöken. I figuren nedan syns övriga relevanta storheter som loggats under försökens gång. Alla storheter har normerats till sitt ursprungsvärde för att variationerna tydligare ska framgå.



*Figur 8: Variation av varvtal, last, bränslekonsumtion, insprutningsmängd och blow by under hela försöksserien, samtliga normerade till sina respektive ursprungsvärden. Det är tydligt att förhållandena har varierat mellan försök A1 och B1 respektive övriga försök.*

Det är tydligt att förutsättningarna varierat kraftigt mellan dom olika försöken. Försök A1 och försök B1 gjordes med varvtalet 1200 varv per minut. Eftersom detta gav en alldeles för snabb oljedegradering i försök B1 sänktes varvtalet till 1100 varv per minut för dom återstående försöken. Detta förde med sig en ännu större ändring av last, bränslekonsumtion och insprutningsmängd och det är oklart i vilken utsträckning detta påverkar oljedegraderingen. Sänkningen av varvtalet gav dessutom en kraftig sänkning av blow by-flödet, vilket antagligen är den främsta förklaringen till att referensförsöket A1, trots lägre temperatur, gav en snabbare degradering än jämförbara försök med högre temperatur. Försök B1 höll den högsta temperaturen och resulterade också i den snabbaste oljedegraderingen, i enlighet med modellen. Det är dock svårt att veta hur stor del av den ökade degraderingstakten som svarade mot den ökade temperaturen och hur stor del som svarade mot det höga blow by-flödet.

Utöver dessa variabler, som mättes, är det också möjligt att andra, ej mätta, storheter som t.ex. EGR-halten har ändrats mellan dom olika försöken, vilket i så fall kan ha påverkat resultatet. För att undvika detta bör fortsatta försök i möjligaste mån isolera dom olika degraderingsprocesserna.

Skillnaden i degradering mellan försök A1 och B1 visar dock att temperaturen har stor inverkan på degraderingstakten. Det finns även en viss skillnad i degraderingstakt mellan försök C1 med det förhöjda kolvkylningsflödet, vilket

## 4.2. OLJEDEGRADERING

medfört en högre genomsnittstemperatur, och dom tre likvärdiga försöken.

Strategin för att så långt som möjligt verifiera modellen blir därför att först jämföra C1 och dom tre likvärdiga försöken för att bestämma temperaturkonstanterna och sedan med bibehållna temperaturkonstanter införa ett linjärt beroende av blow by-flödet och jämföra modellen med försök A1 och B1.

### 4.2.5 Resultat

Modellen prövades mot mätdata i två steg. Först optimerades modellen mot mätdata för medelvärdet av dom tre likvärdiga försöken och försök C1. Därefter gjordes det förenklade antagandet att den ökade blow by-mängden i försök A1 och B1 gav en additiv ökning i degraderingstakten, proportionell mot mängden blow by.

I ett vattenbaserat system skulle basuttömningen genom neutralisering med syror kunna beräknas exakt utifrån ett känt inflöde av syror. Problemet med olja är att det inte kan antas att baser och syror kommer i kontakt med varandra fullt ut, en del baser och syror kan samtidigt befinna sig i oljan utan att någon neutralisering sker [23].

Om det antas att en viss konstant del av syror och baserna kan delta i neutraliseringen bör basuttömningen vara proportionell mot inflödet av sur blow by även om uttömningen inte är fullständig. Proportionalitetskonstanten tillför dock ytterligare en parameter till modellen, vilket ger totalt tre parametrar att optimera med endast fyra tillgängliga mätserier.

För bestämning av konstanterna för modellen för termisk degradering användes mätdata från försök C1 och dom tre likvärdiga försöken. Även mellan dessa mätningar fanns en viss spridning i blow by-flöde men eftersom spridningen endast var några få procent försumrades den.

Parametrarna  $k_{prop}$  och  $k_{exp}$  optimerades med en iterativ process tills en rms-avvikelse på  $10^{-3}$  uppnått. Därefter användes dessa parametervärden tillsammans med mätdata från försök A1 och försök B1 för att bestämma proportionalitetskonstanten för blow by.

Uttrycket för degraderingstakten (ekv 4.3) kompletterades med en term svarandes mot blow by- flödet enligt nedan,

$$D = c \cdot \Delta q_{BB} + k_{prop} \sum_i m_i \cdot e^{-k_{exp}/T_i} \quad (4.4)$$

där  $\Delta q_{BB}$  är den genomsnittliga skillnaden i blow by-flöde jämfört med medelvärdet för försök C1 och dom tre likvärdiga försöken och  $c$  är en proportionalitetskonstant. Därefter optimerades konstanten  $c$  för minimal rms-avvikelse från mätdata.

Den på så sätt uppnådda avvikelsen mellan mätdata och modellresultat är mindre än den inbördes avvikelsen mellan dom tre LOP-försöken och tillgängliga mätdata är därmed inte tillräckliga för att vare sig bekräfta eller förkasta modellen.

#### 4.2.6 Diskussion

Den höga degraderingstakten i referensförsöket A1 visar att det är omöjligt att konstruera en degraderingsmodell utgående från endast temperaturen. Nästa steg i modelleringsprocessen blir därför att inkludera effekterna från blow by i modellen. Även om en sådan modell visar sig tillräcklig kan den dock bli komplicerad att implementera eftersom det i dagsläget inte finns någon tillgänglig modell för blow by. Dessutom kommer innehållet i blow by-gaserna att variera mycket beroende på bränsle och körstil och modellen kommer därmed att behöva göras relativt komplex.

Ur dom tre försöken i Figur 6 kan det konstateras att försöken med oljedegradering har dålig repeterbarhet. Detta innebär stora problem, både då en modell tas fram och när den sedan implementeras.

Under modelleringsprocessen betyder den dåliga repeterbarheten att ett stort antal försök krävs för att skapa en bra modell med korrekta parametervärden. Försökens noggrannhet kan förbättras genom att olika effekter som påverkar degraderingen separeras så långt det är möjligt.

Då modellen slutligen implementeras kommer det inte att vara möjligt att separera dom olika effekterna och stora marginaler kommer att krävas för att säkerställa att modellen inte felaktigt ger för långa oljebytesintervall.

Implementering av en osäker modell med stora marginaler ger endast begränsade fördelar framför dagens användning av schablonvärden. Modellen kommer, i en del fall då det är nödvändigt, förkorta oljebytesintervallet då degraderingstakten ökar men den kommer inte att kunna tillåta kraftigt förlängda oljebytesintervall för dom fall då det egentligen bör vara möjligt.

Ett sätt att förbättra modellens noggrannhet är att kombinera en modell av den typ som föreslagits här, med en indirekt sensor av den typ som föreslagits av Pickert [4]. Detta skulle möjliggöra kontinuerlig bedömning av modellens noggrannhet och därmed skulle modellens marginaler kunna sänkas.

### 4.3. OLJESOTBILDNING

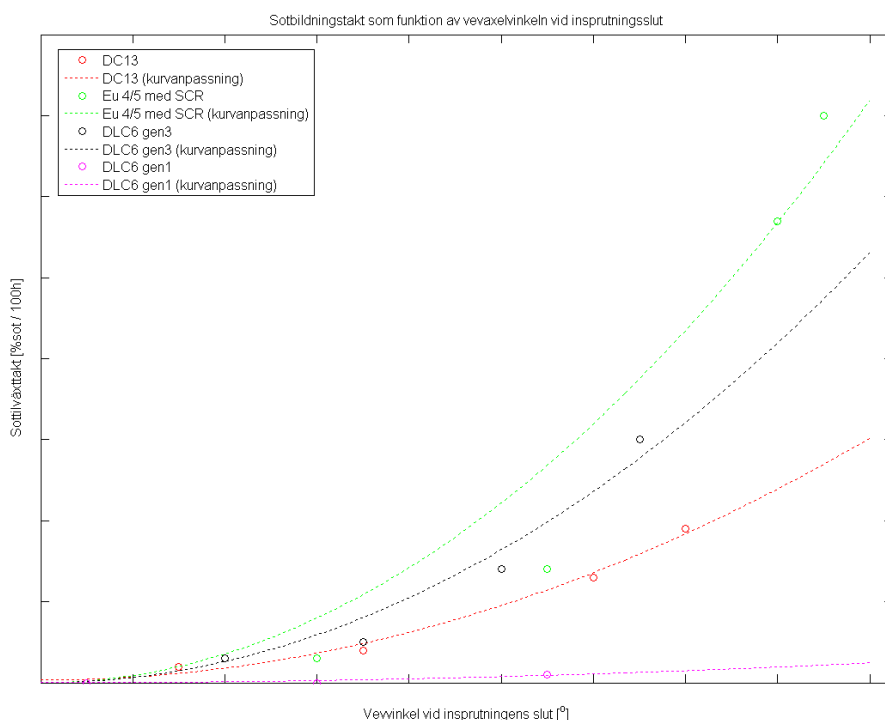
## 4.3 Oljesotbildning

### 4.3.1 Inledning

Modellen för oljesot kommer att utgå från uppmätta oljesotbildningskurvor och utifrån dessa beräkna den totala sotbildningen. Modellens variabler kommer att vara motorns railtryck och vevaxelvinkeln vid slutet av bränsleinsprutningen.

Sotbildningskurvorna tas fram empiriskt av NMED genom prover i testcell redan under motorns utvecklingsfas [27]. Under provet körs motorn med statistiskt varvtal och last medan sotillväxten mäts. Detta upprepas för ett antal olika insprutningsvinklar och därefter interpoleras sotbildningens vinkelberoende fram. Detta görs varje gång motorn ändras på ett sätt som kan antas leda till ökad sotbildning, sotbildningskurvorna ger alltså en övre gräns för sotbildningen som, efter ändringar som minskar sotbildningen, kan vara lägre än vad kurvorna förutspår.

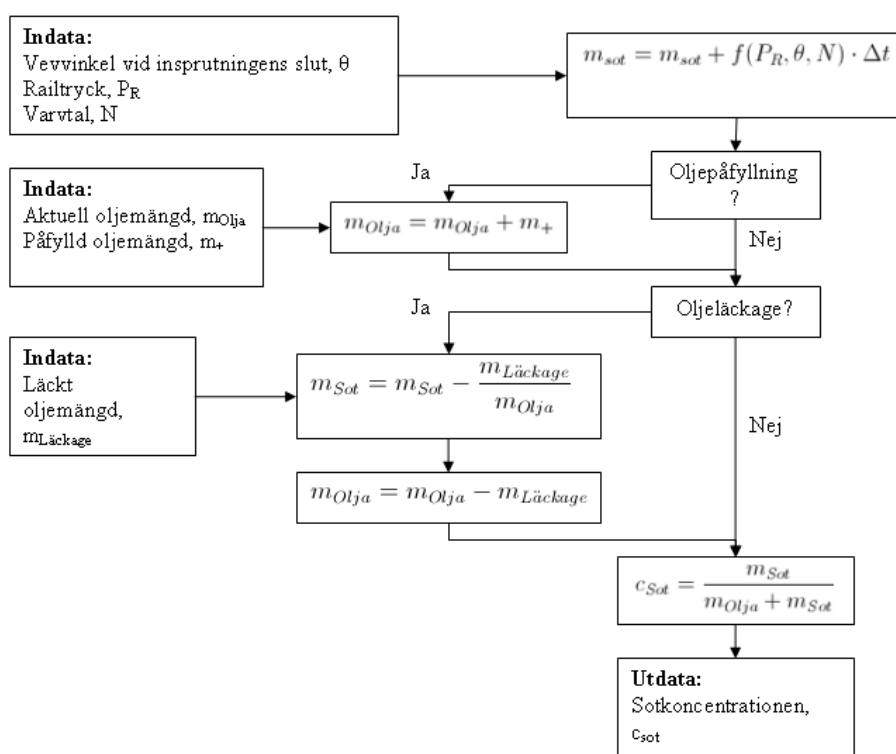
Mätvärdena för sotbildningen och den resulterade sotbildningskurvan har en noggrannhet på ca en grad för vinklarna och under en promille för sothalterna [28]. Därmed kommer vinkelmätningen att vara gränssättande för modellens noggrannhet medan sothalterna kan betraktas som exakta.



Figur 9: Sotbildningstakt i procent sot per 100 h, som funktion av vevaxelvinkeln vid slutet av bränsleinsprutningen

Utifrån dessa sotbildningskurvor och information om den totala oljemängden i motorn kan sotillväxttakten beräknas. Denna sotillväxttakt används sedan för

att beräkna sotkoncentrationen och den återstående tiden till oljebyte enligt modellen nedan. Modellen tar vevaxelvinkeln vid insprutningsslutet, railtrycket, om detta är variabelt, och den maximala tillåtna sothalten i oljan som indata och beräknar sothalten i oljan och den återstående tiden till oljebyte som utdata. Funktionen  $f_{P_R}(\theta)$  är sotstillväxttakten för ett visst railtryck,  $P_R$ , som funktion av insprutningsvinkeln,  $\theta$  och  $c_{grans}$  är den högsta tillåtna sotkoncentrationen i oljan. Om mängden olja ändras, genom läckage eller påfyllning kommer även sotbildningstakten och sothalten att förändras. För att kompensera för detta tar modellen även den aktuella oljemängden,  $m_O$  och eventuell påfylld mängd olja,  $m_+$ , som indata och räknar om sotbildningstakten och sothalten utifrån dessa.



Figur 10: Beskrivning av modellen för oljesot. I figurens övre del beräknas förändringen av massan oljesot med den diskretiserade differentialekvationen. Därefter kompenseras oljemängden för eventuell påfylld eller läckt olja varefter sotkoncentrationen beräknas. Om sotkoncentrationen överskrider något av gränsvärdena skickas denna information till displayen. Annars beräknas en approximativ tid till nästa oljebyte.

Modellen behöver inte kalibreras i sig utan förlitar sig på att sotstillväxtkurvan är tillräckligt noggrann och att den maximala tillåtna sothalten i oljan är lämpligt vald.

Sotstillväxtkurvan beror av ett flertal motorparametrar. Dom viktigaste är paraplyvinkel, snurr, övre ringens position, injektorns längd, cylindermaterial och gropdiameter. Om någon av dessa ändras måste en ny sotbildningskurva mätas upp och modellen måste uppdateras med denna nya kurva.

### 4.3. OLJESOTBILDNING

#### 4.3.2 Diskussion

Av dom processer som styr oljedegenereringen är sotbildning den mest välförstådda. Det är relativt enkelt att mäta sotbildningstakten för varje motor och implementera mätresultaten i en empirisk modell för den totala sotbildningen. Även om dom nödvändiga mätningarna är förhållandevis enkla och snabba att göra skulle det kunna vara fördelaktigt att studera möjligheterna att skapa en modell för sotbildningen utgående från grundläggande storheter som motorgeometri, temperaturer och tryck, som kunde användas för varje ny motor, utan behov av försök i provcell. Arbetet med att skapa en sådan modell bör dock vänta tills dom övriga modellerna anses tillräckligt bra.

## 4.4 Vattenutspädning

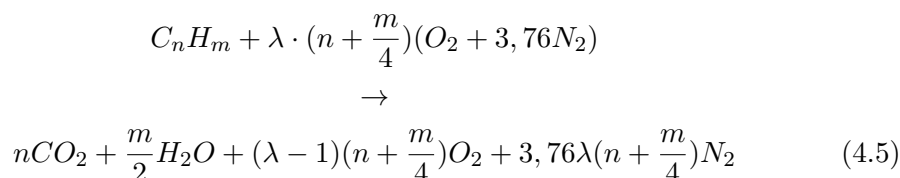
### 4.4.1 Modellbeskrivning

Vattenånga kan kondenseras då dess temperatur minskar eller då dess tryck ökar. Detta kan hända både i motorns luftintag och i EGR-slingan, speciellt om denna är utrustad med tvåstegskylning.

EGR-slinga:

Mängden kondensat i EGR-slingan beräknas ur bränsleflöde, EGR-halt och massförhållandet mellan luft och bränsle. Det antas att alla förbränningsprodukter befinner sig i gastillstånd och att idealgaslagen kan användas. I en dieselmotor råder normalt ett överskott på luft varför det kan antas att bränslet förbränns fullständigt. Bränslet består av kolväten med den generella formen  $C_nH_m$ , luften består till största delen av syrgas och kvävgas med förhållandet 3,76 mol kvävgas per mol syrgas. Både luft och bränsle innehåller även en stor mängd andra ämnen men i så låga halter att dom kan försummas. Massförhållandet mellan luft och bränsle beskrivs av parametern  $\lambda$ , som är det aktuella massförhållandet, dividerat med massförhållandet vid stökiometrisk förbränning.

Under dessa antaganden ges reaktionsformeln för förbränning av en mol bränsle av följande uttryck,



Direkt efter förbränningen befinner sig allt vatten i gasform och forslas ut ur cylindern tillsammans med avgaserna. Då dom gaser som återcirkuleras passerar EGR-kylaren kommer deras temperatur att sjunka och därmed minskar också vattnets ångtryck. Om ångtrycket sjunker under partialtrycket kommer vattenånga att kondensera till dess att den kvarvarande vattenångans partialtryck är lika med ångtrycket.

Vattenångans ångtryck beräknas ur den aktuella temperaturen med Antoines ekvation,

$$P_{ang} = 10^{A-B/(C+T)}$$

där  $T$  är temperaturen och  $A$ ,  $B$  och  $C$  är kända parametrar.

Molvolymer för alla idealgaser är densamma, därmed gäller följande samband för den saturerade vattenångan,

$$P_{ang} = \frac{n_{H_2O}^{(g)}}{n_{gas} + n_{H_2O}^{(g)}} \cdot P_{tot} \quad (4.6)$$

där  $n_{H_2O}^{(g)}$  är mängden vattenånga som blir kvar i gasform,  $n_{gas}$  är mängden övriga gaser och  $P_{tot}$  är det totala trycket. Om mängden gasformigt vatten löses ut ur uttrycket fås:



#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING

$$n_{H_2O}^{(g)} = \frac{P_{ang} \cdot n_{gas}}{P_{tot} - P_{ang}} \quad (4.7)$$

Insättning av uttrycket för mängden gas ur reaktionsformeln och division med den ursprungliga mängden vatten i avgaserna, ger andelen gasformigt vatten:

$$k_g = \frac{n_{H_2O}^{(g)}}{n_{H_2O}} = \frac{P_{ang}(n + (\lambda - 1)(n + \frac{m}{4}) + 3,76\lambda(n + \frac{m}{4}))}{(P_{tot} - P_{ang}) \cdot \frac{m}{2}} \quad (4.8)$$

Andelen vätskeformigt vatten fås därmed som:

$$k_l = 1 - k_g \quad (4.9)$$

Utifrån bränsleflödet till motorn kan flödet av vattenånga beräknas ur reaktionsformeln för förbränningen. Ur detta flöde kan i sin tur flödet av vätskeformigt vatten beräknas, med hjälp av EGR-halten och andelen vätskeformigt vatten.

Varje mol bränsle ger vid förbränning  $m/2$  mol vatten. Om massflödet bränsle in i cylindern är  $q_{bränsle}$  kommer massflödet vattenånga ut ur cylindern att ges av,

$$q_{H_2O,Cyl} = \frac{m}{2} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{bränsle}} \cdot q_{bränsle} \quad (4.10)$$

där  $M_{H_2O}$  och  $M_{bränsle}$  är molmassorna för vatten respektive bränsle. Av denna vattenånga återcirkuleras en viss del,  $k_{EGR}$ . Tillsammans med uttrycket för andelen vätskeformigt vatten ger detta massflödet kondensat från EGR-slingan:

$$q_{H_2O,EGR}^{(l)} = k_l \cdot k_{EGR} \cdot q_{H_2O,Cyl} \quad (4.11)$$

Luftintag:

På liknande sätt beräknas kondensflödet i luftintaget. Masskoncentrationen vattenånga i intagsluften antas vara känd och konstant,  $c_{H_2O}$ . Då luftens tryck ökar kan en del av vattenångan kondenseras. Om koncentrationen gasformigt vatten efter tryckökningen betecknas  $c_{H_2O}^{(g)}$  fås,

$$P_{ang} = c_{H_2O}^{(g)} \cdot \frac{M_{luft}}{M_{H_2O}} \cdot P_{tot} \quad (4.12)$$

där  $M_{luft}$  och  $M_{H_2O}$  är molmassorna för luft respektive vatten och  $P_{tot}$  är det totala trycket i luftintaget. Ur detta uttryck kan  $c_{H_2O}^{(g)}$  lösas ut och massflödet kondens kan beräknas enligt,

$$q_{H_2O,Intag}^{(l)} = (c_{H_2O} - c_{H_2O}^{(g)}) \cdot q_{luft} \quad (4.13)$$

där  $q_{luft}$  är massflödet luft genom luftintaget.

Sammantaget:

Det sammantagna flödet av vätskeformigt vatten fås som summan av flödet från EGR och flödet från luftintaget:

$$q_{H_2O,tot}^{(l)} = q_{H_2O,EGR}^{(l)} + q_{H_2O,Intag}^{(l)} \quad (4.14)$$

Utflöde:

Avdunstningsflödet antas bero av vattenkoncentrationen i oljan och oljans temperatur. Detta bör vara ett rimligt antagande så länge oljetemperaturen är lägre än vattnets kokpunkt. Då oljetemperaturen överstiger denna nivå antas allt vatten ha avdunstat.

Under dessa antaganden ges avdunstningsflödet av,

$$q_{H_2O,Avdunst} = AT \cdot \frac{m_{H_2O}}{m_{tot}} \quad (4.15)$$

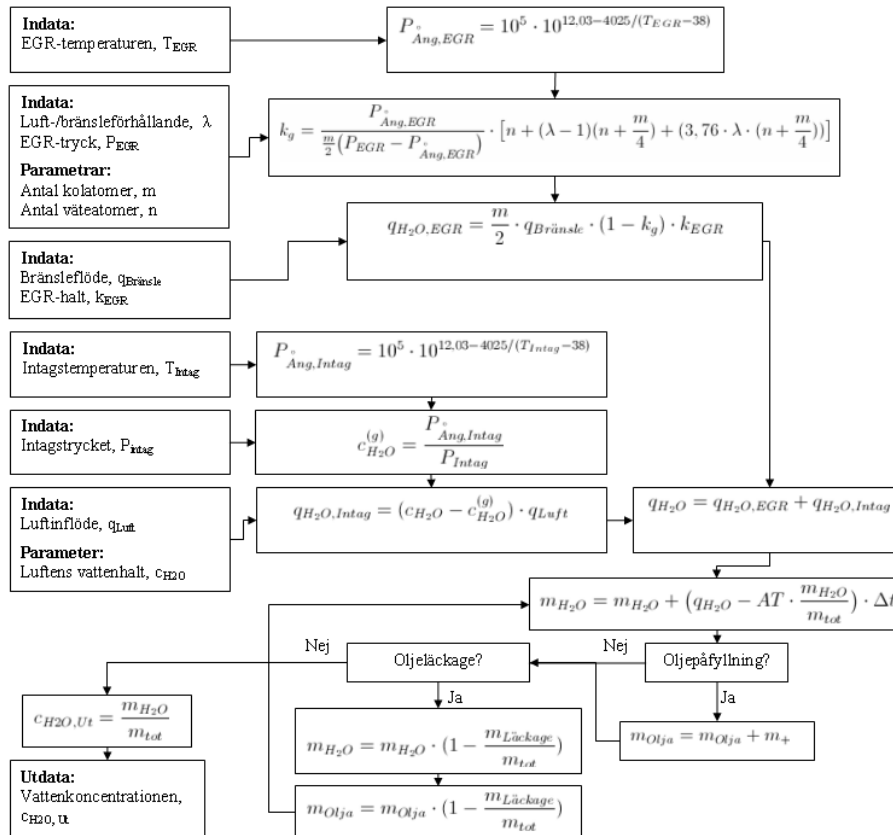
där  $A$  är en proportionalitetskonstant som bestäms genom jämförelse med mätvärden,  $T$  är oljans temperatur,  $T_{ref}$  är en referenstemperatur,  $m_{H_2O}$  är den aktuella mängden vatten i oljan och  $m_{olja}$  är mängden olja.

Vattenhalt: Ur dessa in- och utflöden fås en differentialekvation för vattenmängden i oljan,

$$\frac{dQ_{H_2O}}{dt} = q_{H_2O,tot}^{(l)} - q_{H_2O,Avdunst} \quad (4.16)$$

denna ekvation antas gälla då oljetemperaturen är lägre än hundra grader. Då oljetemperaturen överstiger denna nivå antas allt vatten avdunsta och vattenhalten nollställs fram tills dess att temperaturen underskrider hundra grader igen.

#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING



Figur 11: Beskrivning av modellen för vattenutspädning. I figurens övre del beräknas vattnets ångtryck i EGR-slingan med hjälp av Antoines ekvation. Detta ångtryck används i nästa steg, tillsammans med luft- bränsleförhållandet och bränslets sammansättning till att beräkna halten vatten i gasform. Ur denna halt tillsammans med EGR-halten och bränsleflödet beräknas det totala kondensatflödet från EGR-slingan. Därefter beräknas kondensatflödet från luftintaget på liknande sätt. Då det totala inflödet är känt beräknas mängden vatten i oljan med en diskretisering av differentialekvationen för avdunstning. Därefter kompenseras vatten- och oljemängden för eventuella oljeläckor eller påfyllningar och processen itereras.

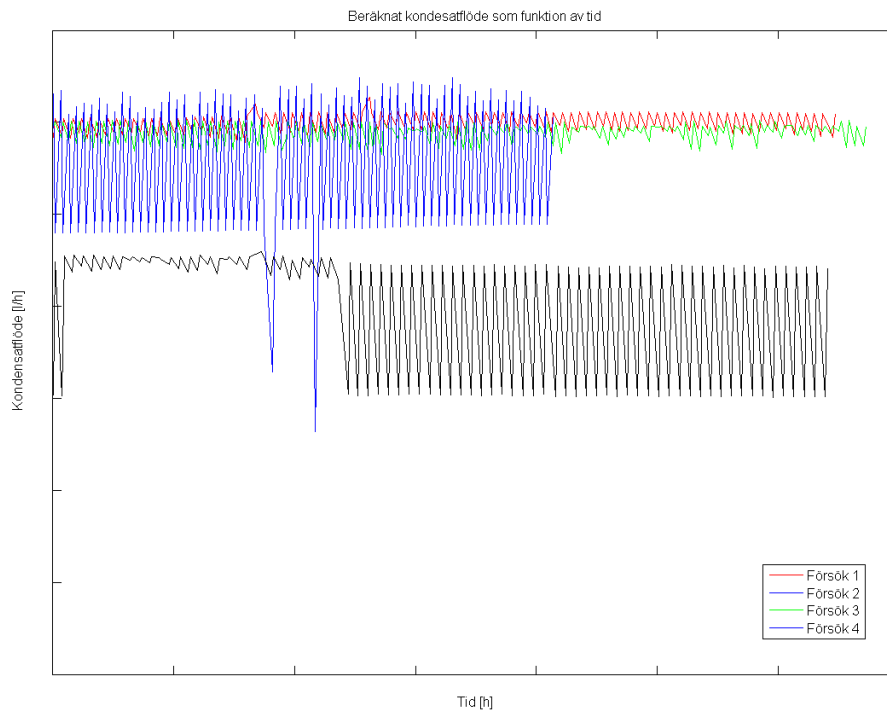
#### Kalibrering

Modellens parameter  $A$  måste kalibreras separat för varje motor. Kalibreringen görs lämpligen genom att olja på förväg utspädd med vatten körs i motorprovcell medan vattenhalten mäts kontinuerligt. För att förbättra modellens noggrannhet bör kondensen från EGR-slinga och luftintag filtreras bort under försöket.

#### 4.4.2 Resultat

Modellen jämfördes med försök gjorda av NMBO med kall EGR [29]. Under försöken gjordes cykliska motorprover, varje cykel startade med en låg kylvätsketemperatur som gradvis steg under provets gång till dess att den givna maximaltemperaturen uppnåts. Därefter kyldes kylvätskan av tills den återgått till ursprungstemperaturen och cykeln upprepades.

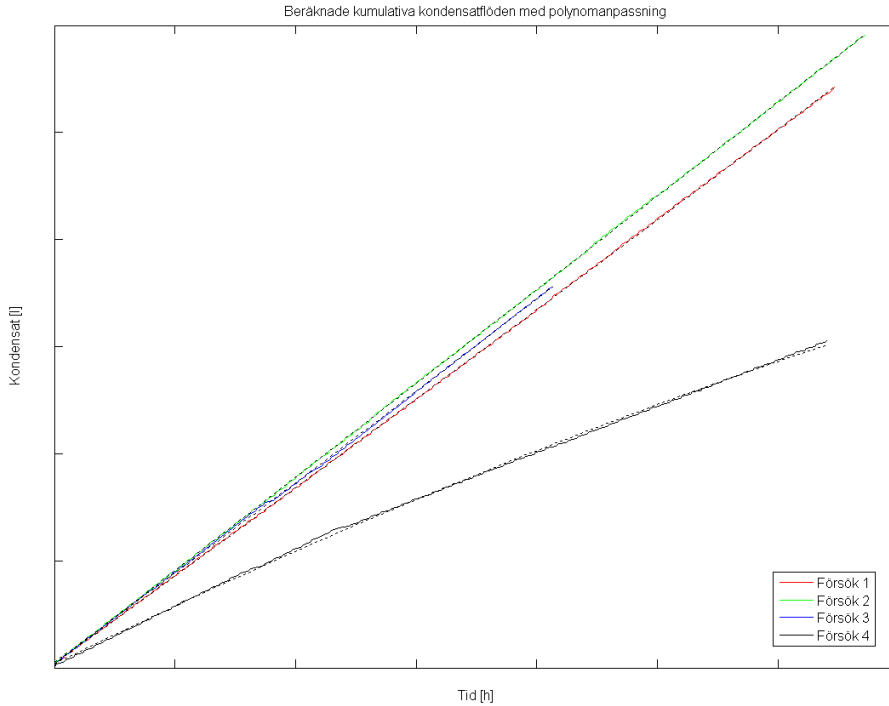
I figuren nedan syns beräknade kondensatflöden för dom fyra mätserierna. Eftersom motorn körts i en cykel varierar flödena periodiskt. Detta ger problem när differentialekvationen för vattenhalten löses numeriskt eftersom den numeriska lösningen lätt blir instabil vilket gör att lösningsalgoritmen väljer mycket kort steglängd. Detta betyder i sin tur att lösningen blir mycket långsam.



*Figur 12: Beräknade kondensatflöden för respektive försök. Det kan ses att flödet är periodiskt med relativt stora variationer mellan sitt maximala och minimala värde. Detta kan skapa problem då differentialekvationen för vattenmängden löses numeriskt.*

För att undvika problemet med instabila lösningar användes istället det kumulativa kondensatflödet i figuren nedan. Polynompassningar av grad  $t^2$  gjordes vilka sedan användes för att verifiera modellen.

#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING



Figur 13: Kumulativt beräknat kondensatflöde med andra gradens polynompassningar. Det kan ses att dom beräknade kondensatmängderna väl approximeras av dom anpassade polynomen.

Därmed är mängden kondensat som funktion av tiden känd ur polynompassningen enligt,

$$Q_{H_2O,tot} = k_1 \cdot t^2 + k_2 \cdot t + k_3 \quad (4.17)$$

vilket ger kondensatflödet,

$$q_{H_2O,tot}^{(l)} = 2k_1 \cdot t + k_2 \quad (4.18)$$

Insatt i differentialekvationen ger detta,

$$\frac{Q_{H_2O}}{dt} = 2k_1 \cdot t + k_2 - \frac{AT}{Q_{olja}} \cdot Q_{H_2O} \quad (4.19)$$

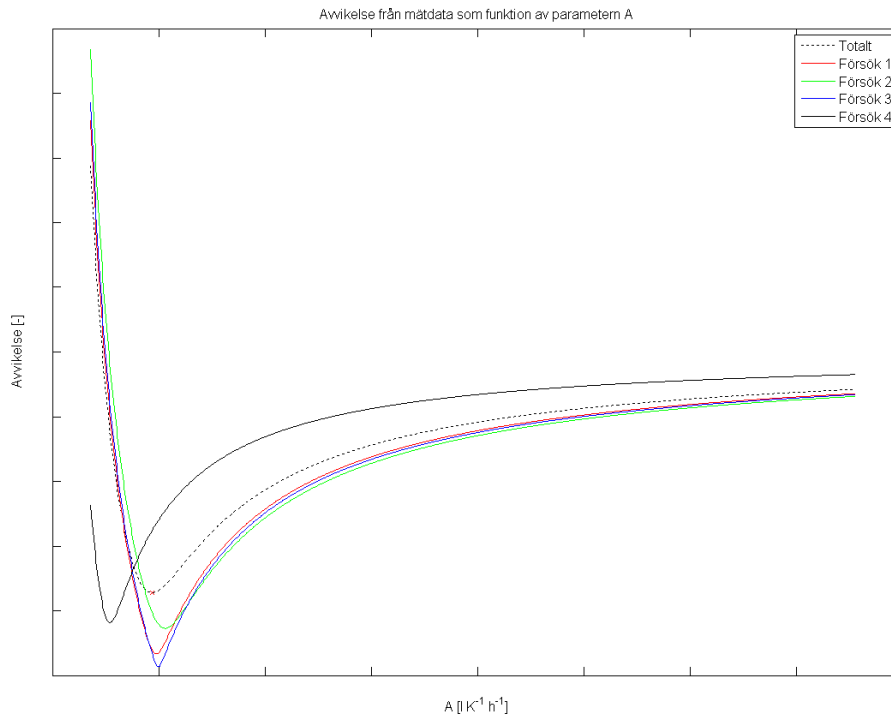
med lösningen,

$$Q_{H_2O} = C \cdot e^{-ATt/Q_{olja}} + \frac{2k_1 \cdot Q_{olja}}{AT} \cdot t + \frac{Q_{olja}}{AT} \left( k_2 - \frac{2k_1 \cdot Q_{olja}}{AT} \right) \quad (4.20)$$

där konstanten  $C$  bestäms av den ursprungliga mängden vatten i oljan. För att bestämma konstanten  $A$  jämfördes den beräknade vattenmängden med mätdata. I figuren nedan syns dom beräknade vattenhalternas relativa avvikelse från mätdata som funktion av parametern  $A$ . Om parametern  $A$  väljs så att den sammantagna avvikelsen minimeras uppnåddes ett minimalt relativt fel,  $\Delta_{RMS} = 0,25$ , enligt,

$$\Delta_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{c_{sim,i} - c_{matt,i}}{c_{matt,i}} \right)^2} \quad (4.21)$$

där  $c_{sim}$  är beräknade vattenhalter i punkter svarandes mot mätpunkterna,  $c_{matt}$ .



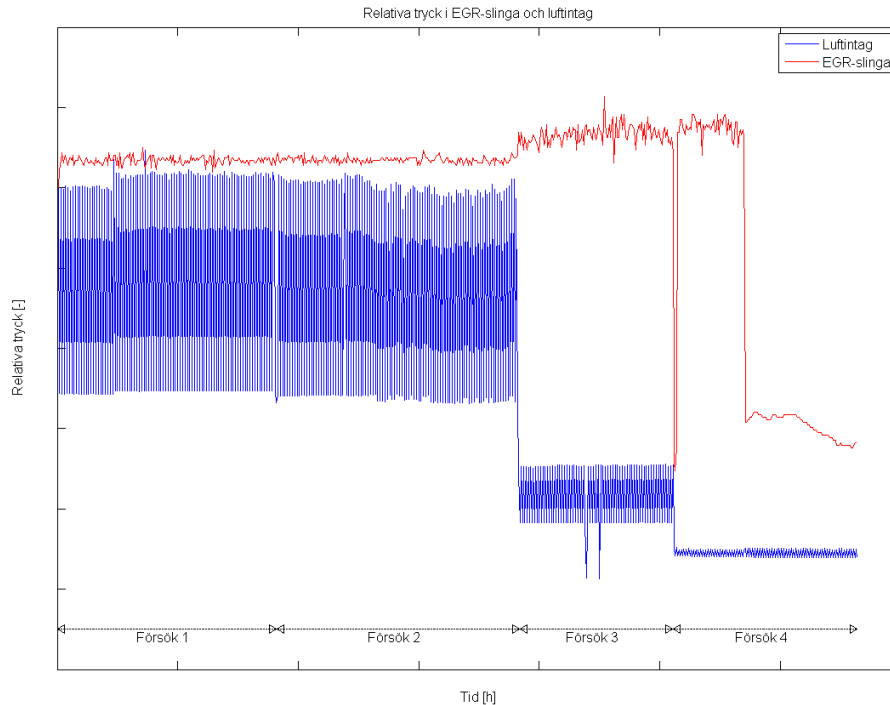
Figur 14: Den modellerade vattenhaltens relativa avvikelse från mätdata som funktion av parametern  $A$ . Det kan ses att det optimala värdet på parametern  $A$  skiljer mellan dom olika försöken.

Det optimala värdet på parametern  $A$  ger en relativt stor avvikelse mellan beräknade och uppmätta vattenkoncentrationer. Till en del förklaras detta av att det optimala valet av parametern  $A$  för mätserierna ett till tre skiljer sig ganska mycket från det optimala valet för mätserie fyra.

Försök fyra hade ett betydligt lägre inflöde av kondens än övriga försök. Anledningen är att dom uppmätta trycken i EGR-slingan och i luftintaget var betydligt lägre än för övriga försök. Det är oklart om detta beror på mätfel eller faktiska avvikelser.

#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING

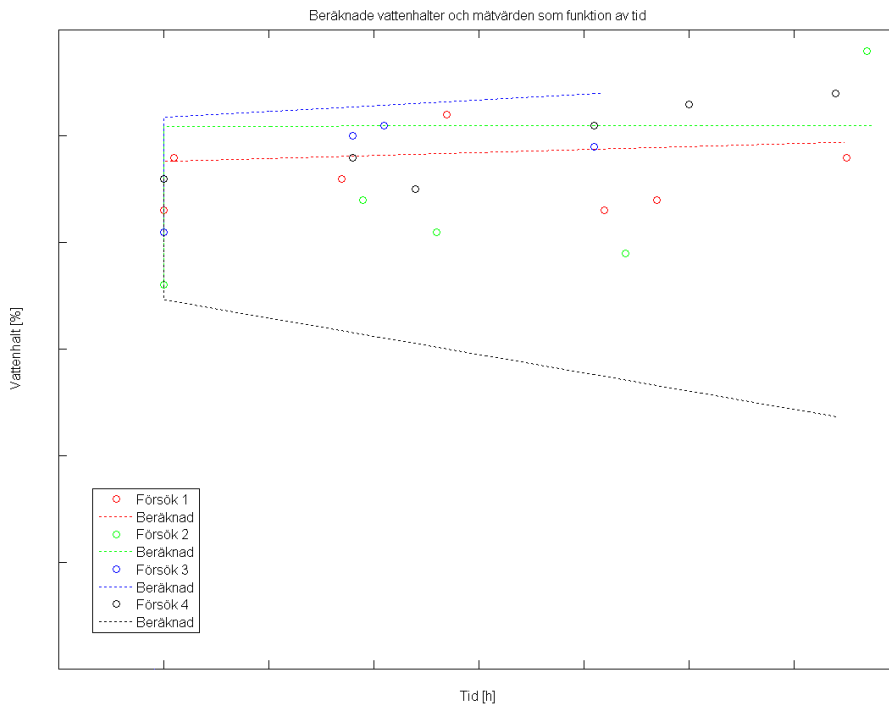
Variationen av trycken kan ses i figuren nedan,



*Figur 15: Variation av trycken i Luftintaget och EGR slingan under samtliga försöksserier, normerade till ursprungsvärdet för att förenkla jämförelse. Trycken betar sig hyfsat likformigt under dom tre första försöken. Efter ungefär halva försök fyra faller dock trycket i EGR-slingan drastiskt. Det är oklart vad denna plötsliga förändring beror på, men den är troligen en del av förklaringen till den kraftiga avvikelser från mätdata för försök fyra.*

En annan trolig bidragande orsak är att avdunstningstakten har överskattats jämfört med övriga försök. I försök ett till tre var lasten betydligt högre än i försök fyra. En hög last ger en hög oljetemperatur i cylindrar och turbo vilket ger en ökad avdunstning relativt vad modellen, som utgår från sumptemperaturen, förutspår.

Beräknad vattenutspädning och mätdata kan ses i figuren nedan. Här syns tydligt att den beräknade vattenutspädningen för försök fyra avviker kraftigt från mätresultaten.

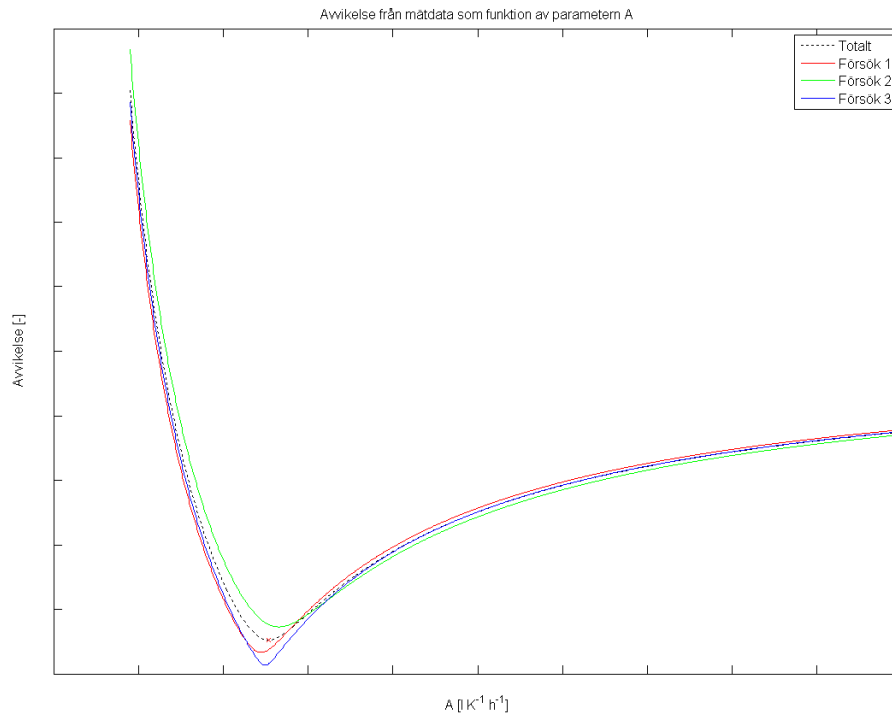


*Figur 16: Beräknade vattenkoncentrationer och mätvärden. Dom beräknade vattenhalterna ger en hygglig överensstämmelse med mätvärdena för mätserie ett till tre. För mätserie fyra ger modellen ett helt felaktigt beteende.*

Man kan dock konstatera att avvikelsen skulle bli stor även om mätserie fyra förkastas. Avvikelsen från mätdata då parametern  $A$  optimerats för mätserie ett till tre kan ses i figuren nedan,

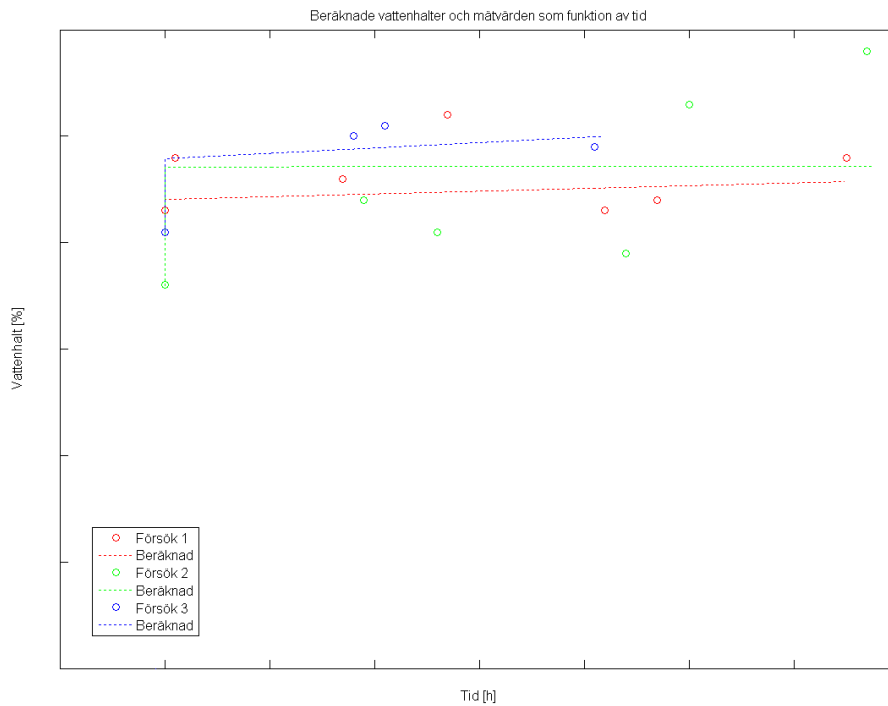


#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING



*Figur 17: Den modellerade vattenhaltens relativa avvikelse från mätdata som funktion av parametern  $A$  för mätserie ett till tre. Det optimala värdet på parametern  $A$  är nära att sammanfalla för försök ett till tre.*

Den minimala sammantagna relativa avvikelsen då parametern  $A$  optimeras med avseende på dessa mätdata blir betydligt lägre än den sammantagna avvikelsen då försök fyra inkluderas. Motsvarande beräknad vattenutspädning och mätvärden kan ses i figuren nedan.



*Figur 18: Beräknade och mätta vattenkoncentrationer för försök ett till tre. Dom beräknade vattenhalterna överrensstämmer väl med ett medelvärde av mätdata men följer inte dess variationer.*

Det finns två möjliga förklaringar till denna spridning i mätdata. En möjlighet är att vattenhalten verkligen varierar kraftigt under körning och att en betydligt mer komplex modell därmed kommer att behövas. Detta verkar dock osannolikt eftersom alla kända yttre parametrar har varit konstanta under försökens gång. Alltså måste variationerna antingen ha orsakats av någon okänd yttre parameter eller vara en följd av själva avdunstningsprocessen. Den andra möjliga förklaringen är att spridningen beror på mätfel. Detta skulle i så fall betyda att det är mycket svårt att verifiera eller förkasta modellen.

#### 4.4. VATTENUTSPÄDNING

##### 4.4.3 Diskussion

Det är svårt avgöra om modellen för vattenutspädning är korrekt eller inte. Modellen förutsäger att vattenhalten snabbt närmar sig ett jämviktsläge mellan inflöde och avdunstning, medan mätdata varierar kraftigt, möjligen kring det jämviktsläge som modellen förutspår.

Tillgängliga mätdata medgav inte direkt jämförelse mellan beräknade och faktiska flöden, utan endast jämförelser mellan dom resulterande vattenhalterna. Fördelningen av dom beräknade flödena har varierat mellan dom olika försöken och det skulle därför vara fördelaktigt att mäta dessa flöden direkt för vidare verifiering av modellen.

Den maximala tillåtna vattenhalten i motorolja i drift är betydligt högre än någon av dom koncentrationer som uppnåtts under försöken. Den förhållandevis stora relativa avvikelserna mellan beräknade och uppmätta vattenhalter svarar därmed mot en relativt liten absolutavvikelse.

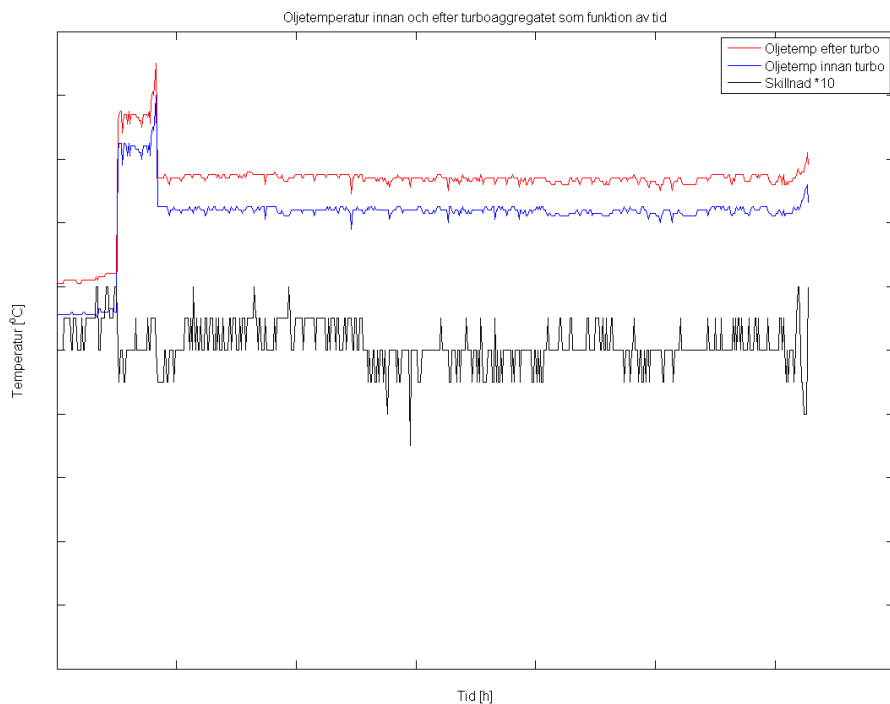
Eftersom modellen främst kommer att vara av intresse då vattenkoncentrationen närmar sig gränsen bör fortsatta försök uppnå högre vattenkoncentrationer för att verifiera modellen i detta område.

## 4.5 Temperaturmodeller

Inga temperaturer mäts i styrsystemet och därför måste dom beräknas utifrån andra tillgängliga mätvärden. Dom tre temperaturer som behöver beräknas är, temperaturen i oljesumpen, temperaturen på cylinderväggen och temperaturen i turboaggregatet.

### 4.5.1 Temperatur i turboaggregat

Oljetemperaturen i turboaggregatet följer temperaturen i oljesumpen med en konstant temperaturskillnad [30]. Denna enkla modell har jämförts med tillgängliga mätdata från oljedegraderingsförsöken. I figuren nedan syns oljetemperaturen, före och efter turboaggregatet och skillnaden dom emellan.



*Figur 19: oljetemperaturens ökning över turboaggregatet. Det kan ses att temperaturskillnaden är konstant, oberoende av hur oljetemperaturen varierar. Modellen tycks alltså vara tillräckligt noggrann.*

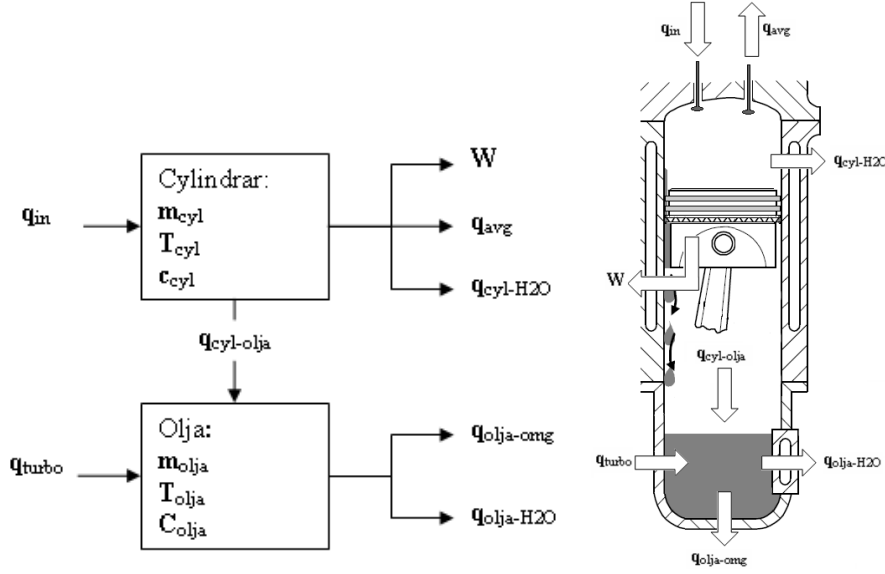
Modellens noggrannhet tycks vara fullt tillräcklig, utifrån dessa mätdata. För att bekräfta modellens giltighet i fält bör den även prövas i fältprov innan oljedegraderingsmodellen implementeras i styrsystemet. Speciellt bör modellen prövas vid transienta förhållanden då termisk tröghet i systemet bör försämra modellens överensstämmelse med verkligheten.

#### 4.5. TEMPERATURMODELLER

##### 4.5.2 Temperatur efter kolvkyllning och i oljesump

Modellbeskrivning

Oljans temperatur i oljesumpen och efter kolvkyllningen beräknas utifrån kända värmeflöden i motorn och flödesbalans för cylindrarna och motoroljan,



Figur 20: Beskrivning av temperaturmodellen. Värmeflödet  $q_{in}$  är energiflödet från det förbrända bränslet,  $W$  är motorns mekaniska arbete och  $q_{avg}$  är värmeflödet som lämnar motorn med avgaserna. Värmeflödet  $q_{cyl-H_2O}$  är värmeflödet som tas upp av kylvätskan från cylindrarna,  $q_{cyl-olja}$  är värmeflödet som tas upp av oljan vid kolvkyllningen,  $q_{turbo}$  är värmeflödet från turbon till oljesumpen  $q_{olja-omg}$  är värmeflödet från oljesumpen till omgivningen och  $q_{olja-H_2O}$  är värmen som tas upp av vattnet från oljan i oljekylaren.

Flödesbalans för systemet ger följande differentialekvationer,

$$\frac{dT_{cyl}}{dt} = \frac{1}{m_{cyl}c_{cyl}} [q_{in} - W - q_{avg} - q_{cyl-H_2O} - q_{cyl-olja}] \quad (4.22)$$

$$\frac{dT_{olja}}{dt} = \frac{1}{m_{olja}c_{olja}} [q_{cyl-olja} + q_{turbo} - q_{olja-omg} - q_{olja-H_2O}] \quad (4.23)$$

dom okända värmeflödena antas bero linjärt av temperaturskillnaden. Detta ger följande ekvationer,

$$q_{cyl-H_2O} = k_{cyl-H_2O} \cdot (T_{cyl} - T_{H_2O}) \quad (4.24)$$

$$q_{cyl-olja} = k_{cyl-olja} \cdot (T_{cyl} - T_{olja}) \quad (4.25)$$

$$q_{olja-omg} = k_{olja-omg} \cdot (T_{olja} - T_{omg}) \quad (4.26)$$

$$q_{olja-H_2O} = k_{olja-H_2O} \cdot (T_{olja} - T_{H_2O}) \quad (4.27)$$

Värmeflödet från turbon kan beräknas ur följande samband,

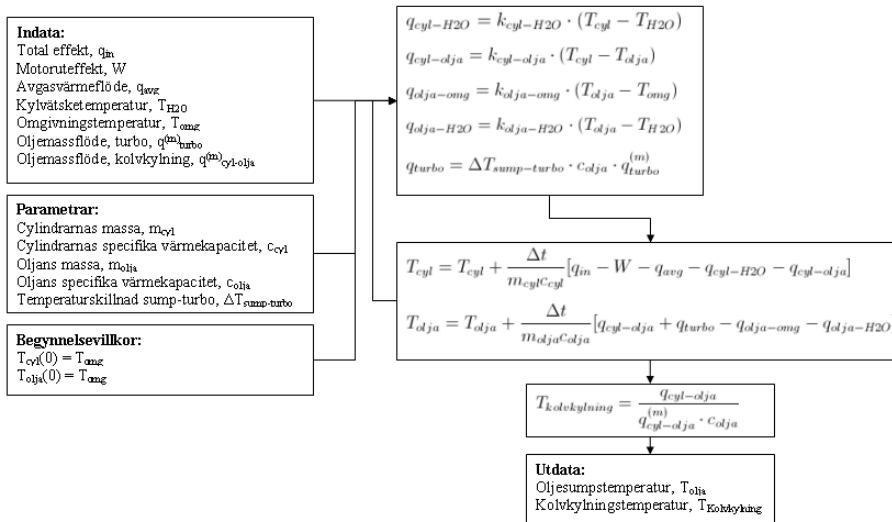
$$q_{turbo} = \Delta T_{sump-turbo} \cdot c_{olja} \cdot q_{turbo}^{(m)} \quad (4.28)$$

där  $\Delta T_{sump-turbo}$  är den kända temperaturskillnaden mellan oljetemperaturen i turbon och sumptemperaturen och  $q_{turbo}^{(m)}$  är massflödet av olja genom turboaggregatet.

Då det oljeförmedlade värmeflödet mellan cylindrar och oljesump är känt kan även oljetemperaturen vid kolvkyllningen beräknas enligt,

$$T_{kolvkyllning} = \frac{q_{cyl-olja}}{q_{cyl-olja}^{(m)} \cdot c_{olja}} \quad (4.29)$$

där  $q_{cyl-olja}^{(m)}$  är massflödet olja till kolvkyllningen.



Figur 21: Beskrivning av modellen för temperaturberäkning. I modellens övre del beräknas värmeflödena till och från cylindrarna och motoroljan utifrån deras respektive temperaturer. Vid första iterationen antas dessa temperaturer vara lika med omgivningstemperaturen, därefter används dom beräknade temperaturerna. I modellens nästa steg används värmeflödena för att beräkna olje- och cylindertemperaturen. Därefter returneras temperaturerna till värmeflödesberäkningen, för beräkning av nästa iteration samt presenteras som utdata.

## 4.5. TEMPERATURMODELLER

### Kalibrering

Modellen innehåller fyra parametrar som måste kalibreras,  $k_{cyl-H_2O}$ ,  $k_{cyl-olja}$ ,  $k_{olja-omg}$  och  $k_{olja-H_2O}$ . Kalibreringen görs med hjälp av motorprov. Motorn, som måste ha haft tid att komma i jämvikt med en känd omgivningstemperatur, startas och körs med cykliskt varierande varvtal eller last så att det totala värmeinflödet  $q_{in}$  varierar.

För att förhindra att den numeriska lösningen av modellens differentialekvationer blir instabil bör variationerna vara relativt långsamma. Under ett tidssteg,  $\Delta t$ , måste variationen i temperatur vara lägre än den önskade modellnoggrannheten. För cylindertemperaturen ger detta,

$$\frac{\Delta q_{In}}{\Delta t} \leq m_{cyl} c_{cyl} \cdot \Delta T$$

där  $\Delta T$  är den maximala önskade modellavvikelsen och  $\Delta q_{In}$  är ändringen i värmeinflöde under ett tidssteg. Motsvarande krav för oljetemperaturen är svårare att beräkna, men eftersom den snabbaste förändringen av oljetemperaturen sker vid kolvkyllningen, då oljan kommer i direkt kontakt med cylindrarna, bör oljans temperatur ändras långsammare än cylindrarnas.

Under försöket mäts alla temperaturmodellens indata, oljans temperaturökning då den passerar kolvkyllningen, och dess temperaturminskning då den passerar oljekylaren, kylvätskans värmeökning då den passerar motorn respektive oljekylaren samt temperaturen i oljesumpen.

Ur oljans temperaturminskning över oljekylaren och dess kända värmekapacitet kan värmeffödet  $q_{olja-H_2O}$  beräknas. För att öka noggrannheten kan detta flöde jämföras med kylvätskans temperaturökning över oljekylaren.

Då värmeffödet  $q_{olja-H_2O}$ , oljetemperaturen,  $T_{olja}$  och kylvätsketemperaturen,  $T_{H_2O}$  är kända, kan parametern  $k_{olja-H_2O}$  beräknas enligt,

$$k_{olja-H_2O} = \frac{q_{olja-H_2O}}{T_{olja} - T_{H_2O}} \quad (4.30)$$

Därmed är alla storheter i differentialekvationen för oljesumpens temperatur (ekv 4.22) utom värmeffödet till omgivningen kända. Detta ger ett uttryck för det okända värmeffödet,

$$q_{olja-omg} = q_{cyl-olja} - q_{olja-H_2O} - mc \cdot \frac{dT_{olja}}{dt} \quad (4.31)$$

där tidsderivatan av oljesumptemperaturen beräknas genom numerisk derivering av den uppmätta temperaturen.

Då värmeffödet  $q_{olja-omg}$  är känt, kan parametern  $k_{olja-omg}$  beräknas enligt,

$$k_{olja-omg} = \frac{q_{olja-omg}}{T_{olja} - T_{omg}} \quad (4.32)$$

Eftersom cylindertemperaturen inte är känd blir osäkerheten i beräkningen av värmeffödet från cylindrarna större. Först beräknas cylindertemperaturen genom

att dom mätta värmeflödena till kylvätskan och motoroljan sätts in i differentialekvationen för cylindertemperaturen (ekv 4.22). Begynnelsevillkoret ges av att cylindrarna antas ha varit i termisk jämvikt med omgivningen vid startögonblicket. Den beräknade cylindertemperaturen används tillsammans med dom kända värmeflödena  $q_{cyl-H_2O}$  och  $q_{cyl-olja}$  för att beräkna parametrarna  $k_{cyl-H_2O}$  och  $k_{cyl-olja}$ ,

$$k_{cyl-H_2O} = \frac{q_{cyl-H_2O}}{T_{cyl} - T_{H_2O}} \quad (4.33)$$

$$k_{cyl-olja} = \frac{q_{cyl-olja}}{T_{cyl} - T_{olja}} \quad (4.34)$$

Eftersom den föreslagna modellen är en förenkling av dom verkliga värmeflödena är det troligt att dom beräknade parametervärdena kommer att variera under försökets gång. För att bedöma modellens giltighet bör variationerna undersökas, stora variationer är en indikation på att modellen behöver förbättras.

När modellens parametrar är bestämda bör modellen verifieras ytterligare, antingen genom ytterligare försök eller genom jämförelse med tidigare körningar, där alla modellens indata och temperaturen i oljesumpen finns loggade.



## Kapitel 5

# Sammanfattning av resultat

### 5.1 Bränsleutspädning

En modell för beräkning av bränsleutspädningen utifrån temperaturen i oljesumpen har tagits fram och jämförts med mätdata från försök med bränsleavkokning. Mätdata från tre försök användes. Avvikelserna mellan mätdata och simuleringsresultat var relativt låga.

### 5.2 Oljedegradering

En modell för beräkning av oljedegraderingen utifrån oljetemperaturen i oljesumpen, efter turboaggregatet och efter kolvkylningen har tagits fram och jämförts med mätdata. Utifrån tillgängliga mätdata är det inte möjligt att vare sig bekräfta eller förkasta modellen och den är i behov av nya försök för att kunna vidareutvecklas.

### 5.3 Oljesotbildning

Tillgängliga modeller för oljesotbildning har undersökt och den empiriska modell som för tillfället används på Scania har visat sig tillräcklig. Modellen beräknar oljesotbildningen utifrån railtrycket och vevaxelvinkeln vid insprutning, dess noggrannhet är beroende av mätningen av vevaxelvinkeln vid insprut.

### 5.4 Vattenutspädning

En modell för beräkning av vattenutspädningen utifrån temperaturer och tryck i luftintag respektive EGR-slinga samt luft- bränsleförhållandet och temperaturen i oljesumpen har tagits fram och jämförts med mätdata. Modellen avviker ganska kraftigt från mätdata, men det är oklart om det beror på modellen eller mätdata. För att avgöra modellens giltighet behövs nya försök.

## 5.5 Temperaturmodeller

Enkla modeller för oljetemperaturen i oljesumpen, i turboaggregatet och efter kolvkyllningen har skapats. Endast modellen för turboaggregatet har jämförts med mätdata i mycket begränsad omfattning och deras överrensstämmelse med verkligheten är därmed oklar.

## Kapitel 6

# Slutsatser

Dom olika modellernas överrensstämmelse med mätdata har varierat enligt summeringen ovan. Modellen för bränsleutspädning gav god överrensstämmelse och denna modell är i stort sett klar att testa i fält. Modellen för vattenutspädning gav betydligt sämre resultat, men även den bör vara möjlig att åtgärda med hjälp av nya försök.

Sämst resultat gav oljedegraderingsmodellen och det finns anledning att tro att detta inte endast beror på själva modellen utan att även degraderingens komplexa dynamik spelar in. Oljedegraderingen är det minst kända degenereringsförloppet. Det beror av ett stort antal olika faktorer och är till en del autokatalyserande vilket gör att små fel i modellen snabbt fortplantar sig, vilket kraftigt försämrar noggrannheten i en modell utan återkoppling.

Samtidigt är det oljedegraderingen som sätter gränsen för oljebytesintervallen och därmed är det den viktigaste processen att modellera.

Utifrån nya mätdata går det förhoppningsvis att skapa och verifiera en bättre modell för oljedegraderingen, men eftersom degraderingen beror av så många faktorer är det antagligen omöjligt att skapa en tillräckligt noggrann modell utan någon form av återkoppling.



# Kapitel 7

## Förslag till vidare arbete

### 7.1 Bränsleutspädning

Modellen för bränsleinflöde har ännu inte prövats mot mätdata, men det finns anledning att tro att dess resultat varierar beroende på driftsfall.

Modellen antar ett konstant inflöde av bränsle under regenerering. Detta kommer att fungera så länge förhållandena under regenerering hålls konstanta, men i verklig drift kan både regenereringens varaktighet och intensitet komma att förändras.

För att hantera detta bör inflödesmodellen istället utgå från mängden insprutat bränsle och insprutningsvinkel, vilket är dom två faktorer som har störst inverkan på bränsleinflödet.

I dagsläget finns inga mätdata för att ta fram och verifiera en sådan modell.

Förslag på hur sådana data kan tas fram ges i avsnittet ”Provplan”.

Avdunstningsmodellen har visat god överensstämmelse med mätdata, men det finns fortfarande utrymme för ett antal förbättringar som kan göra modellen mer noggrann och allmängiltig.

Under modellens verifiering prövades tre olika temperaturberoenden som gav snarlika resultat. För att avgöra vilket temperaturberoende som är korrekt krävs fler försök. För att skillnaden dom emellan ska märkas tydligt bör försöken göras så långa som möjligt vilket ger avvikelsen mellan dom olika modellerna längre tid att ackumuleras.

Vid verifieringen konstaterades också att avdunstningstaktens beroende av bränslekoncentrationen var svagt och att det möjligen skulle vara tillräckligt att använda en modell där avdunstningstakten är oberoende av den aktuella bränslekoncentrationen. Eftersom detta skulle vara fördelaktigt då modellen implementeras bör det undersökas om en sådan modell är tillräcklig för att beräkna bränsleutspädningen under ett helt oljebytesintervall.

I avkokningsförsöken som användes för att verifiera modellen användes ren FAME. I verklig drift används oftast vanlig diesel, ren eller med olika halter av inblandad FAME. För att kunna modellera även sådana blandningar måste modellen innehålla ytterligare parametrar som beskriver bränslets egenskaper.

Försök kommer att göras med avkokning av ren diesel och olika blandningar av diesel och FAME [33]. Då dessa försök är klara bör det först undersökas om den modell som föreslagits i detta examensarbete även beskriver ren diesel med tillräcklig noggrannhet.

Modellen borde ge bra resultat även för diesel, men eftersom diesel är mer lättflyktigt än FAME kommer modellparametrarna att behöva justeras.

Om modellen ger bra resultat för ren diesel bör det undersökas om den även kan hantera blandningar av diesel och FAME. En rimlig första ansats är att modellera blandningen med en kombination av en modell för diesel och en för FAME, båda med sina egna modellparametrar och bränslemängder.

Detta är en förenkling då det är troligt att dom olika bränslena interagerar i oljesumpen, vilket komplicerar modelleringen. Normalt är dock bränslehalten i motoroljan relativt låg varför det förhoppningsvis går att bortse från denna effekt. Processen för att ta fram en sådan modell finns beskriven i bilaga C.

För att ytterliggare förbättra modellens noggrannhet skulle uttrycket som beskriver anrikningen av tyngre bränslekomponenter i oljan kunna förbättras. Det nuvarande uttrycket är en rent empirisk funktion av andelen avdunstat bränsle,

$$\frac{dm}{dt} \sim \frac{1}{1 + Bx + Cx^2} \quad (7.1)$$

där  $B$  och  $C$  är justerbara modellparametrar och  $x$  är andelen avdunstat bränsle.

Det vore antagligen fördelaktigt att istället använda ett uttryck baserat på bränslekomponenternas kokpunkter och förångningsentalpier. Om kokpunkterna för dom ingående bränslekomponenterna är kända kan modellen sätta halterna för alla komponenter, med kokpunkter lägre än den aktuella oljetemperaturen, till noll och med hjälp av förångningsentalpierna för kvarvarande bränslen beräkna ett mer exakt uttryck för det kvarvarande bränslets avdunstningstakt.

Detta kan åstadkommas genom att uttrycket ovan (35) byts ut mot följande uttryck,

$$\frac{dm_j}{dt} \sim A_j \cdot e^{-H_j} \quad (7.2)$$

där avdunstningstakten för bränslekomponent  $j$  är proportionell mot den negativa exponenten av dess förångningsentalpi [32]. Det är troligt att detta, mer exakta uttryck för anrikningen av tyngre bränslekomponenter i oljan skulle innebära en kraftig förbättring av modellen, eftersom skillnaden i avdunstningstakt varierar kraftigt med tiden [7],[8].

Det kan dock bli problematiskt att använda modellen i verklig drift eftersom det finns ett stort antal olika bränslen på marknaden och varje bränsle innehåller ett stort antal olika komponenter.

För att hantera dessa problem bör antalet komponenter hållas så lågt som möjligt, genom att ämnen med liknande förångningsentalpier räknas som en komponent.

Även efter dessa förenklingar kommer den förbättrade modellen kräva betydligt mer kalibrering och det måste därför undersökas om detta kan motiveras av den förbättrade noggrannheten.

## 7.2 Oljedegradering

Eftersom det oftast är oljedegraderingen som sätter gränsen för oljebytesintervallet är det avgörande att denna delmodell är tillförlitlig. För att vidare undersöka den föreslagna modellens giltighet måste fler försök göras. Dessa försök bör göras på ett sätt som gör det möjligt att skilja den termiska degraderingens effekter från övrig degradering. För att fullständigt kunna skilja bort övrig degradering inleds därför dom nya försöken med en serie laboratorieförsök där temperaturens inverkan på oljedegraderingen studeras.

Uppvärmningstaktens effekt på oljedegraderingen bör också undersökas under laboratorieförsöken, för att avgöra om modellen skulle förbättras genom införandet av zonberoende konstanter, vilket föreslogs i avsnittet "Modellbeskrivning". En sådan modell skulle behöva en betydligt fler parametrar, vilket skulle göra den mer komplicerad att kalibrera. Om uppvärmningstaktens inverkan inte är alltför stor vore det därför fördelaktigt att använda en modell med samma parametrar för alla zoner.

I avsnittet "Mätdata" konstaterades att en modell baserad enbart på temperaturen inte är tillräcklig för att beskriva oljedegraderingen. Av dom storheter som varierade mellan försöken misstänks blow by-flödet ha orsakat den oväntat kraftiga degraderingen i försök A1. För att kunna skapa en modell för oljedegradering krävs alltså data på hur blow by påverkar oljedegraderingen. Sådana data tas lämpligen fram i laboratorium genom väl kontrollerad tillförsel av på förväg insamlad blow by, vilket möjliggör noggrann kontroll över dess flöde och innehåll. Under verklig drift kommer blow by-gasernas sammansättning att variera beroende på vilket bränsle som används. Det skulle kräva orealistiskt många försök att pröva tillräckligt många bränslen för att exakt kunna modellera detta. Istället bör försök göras med blow by från två eller tre olika bränslen. Därefter är det förhoppningsvis möjligt att i blow by modellen använda ett blow by-flöde, kompenserat för varje blow by-typs surhetsgrad, vilket bör vara en lämplig och lättbestämd indikator på bränslets effekt på oljedegraderingen. Ett problem med att inkludera blow by i modellen är att blow by-flödet inte mäts i vanlig drift och att det i dagsläget inte finns någon modell för att beräkna det. Parallellt med skapandet av en modell för hur blow by påverkar oljedegraderingen måste alltså en modell för hur blow by-flödet beror av andra mätbara storheter skapas.

Även oförbränt bränsle som hamnar i oljesumpen har en skadlig inverkan på oljan [5], [10] och ytterligare en tänkbar förbättring av oljedegraderingsmodellen är därför att låta den bero av bränsleutspädningsmodellen. För att detta ska vara möjligt måste det undersökas hur oförbränt bränsle påverkar oljedegraderingen.

I en motor råder andra förhållanden än i ett provrör och det finns anledning att tro att olika faktorer som inte ingår i modellen som t.ex. mekaniskt slitage och katalysatorer i form av metallrester kommer att påverka degraderingstakten [34]. Dessa faktorer kommer dock att variera mycket mellan olika motorer och det är en

## KAPITEL 7. FÖRSLAG TILL VIDARE ARBETE

förutsättning för att en enkel modell, som kan användas i alla motorer utan alltför mycket kalibrering, ska fungera att deras effekt är mindre än effekten av mät- eller modellerbara storheter som t.ex. temperatur och blow by. För att kunna bedöma detta måste modellen verifieras i motorprovcellsförsök. Om modellen ger bra resultat även i provcell, för ett antal olika motorer, är detta en tydlig indikation på att det går att skapa en allmän, motoroberoende, modell.

I avsnittet "Mätdata" konstaterades att degraderingen skiljer mellan olika oljor. Den färdiga modellen måste alltså innehålla justerbara oljeberoende parametrar. För att avgöra hur degraderingstakten beror av oljekvaliteten krävs försök med olika oljor.

Med tanke på den stora mängden oljor på marknaden måste det vara möjligt att snabbt kalibrera om modellen för en ny oljetyp och varje olja måste därmed modelleras med ett begränsat antal parametrar som enkelt kan bestämmas genom direkt mätning på oljan.

Om modellen ska vara användbara måste det funktionella beroendet av temperatur och blow by vara detsamma för alla oljor, annars skulle en separat modell krävas för varje oljetyp vilket vore helt orealistiskt.

Försöken bör göras i motorprovcell, för ett antal temperaturer och blow by flöden för varje olja varefter det undersöks om oljekvaliteten kan modelleras t.ex. genom en oljekvalitetsberoende faktor som multiplicerar degraderingstakten, i likhet med en tidigare föreslagen modell [31].



## 7.3 Vattenutspädning

Modellen för vattenutspädning gick inte att verifiera med tillräcklig noggrannhet utifrån tillgängliga mätdata. För modellens verifiering krävs nya försök, gjorda så att modellens olika delar kan undersökas separat.

Som synes i Figur 13 gav tre av dom fyra tillgängliga mätserierna upphov till liknande vatteninflöden, trots ganska olika förutsättningar. Detta kan undvikas helt om kondensatflödena mäts direkt. På så sätt går kondensatflödet i EGR-slingan att skilja från kondensatflödet i luftintaget och det sammantagna inflödet av vatten går att mäta separat från avdunstningsflödet.

För att säkerställa att modellen ger goda resultat för alla normalt förekommande driftsfall bör försöken göras med varierande tryck och temperaturer i EGR-slingan och luftintaget. Genomgående bör EGR-halten väljas så hög som möjligt, för att ge ett stort kondensatflöde från EGR-slingan som är lätt att mäta. Försöken bör dessutom göras med ett antal olika oljetemperaturer, för att verifiera avdunstningsmodellen.



# Kapitel 8

## Provplan

### 8.1 Bränsleutspädning

I slutändan måste modellen prövas i alla motorer där den ska användas och därmed kan vilken motor som helst användas för dess första verifiering. Det är dock viktigt att samma motor används för alla dom nedanstående försöken vilket möjliggör jämförelser dom emellan.

#### 8.1.1 Försök för skapande av förbättrad inflödesmodell

För att avgöra bränsleinflödets beroende av insprutningsvinkel och insprutad mängd bränsle görs ett antal försök i motorprovcell. Ett antal regenereringar av efterbehandlingssystemet görs och bränslehalten i oljesumpen mäts. Under försöket loggas insprutningsvinkel och insprutad mängd bränsle. För att i möjligaste mån avgöra om några andra mätbara storheter påverkar inflödet bör även t.ex. varvtalet m.fl. storheter loggas under alla körningar.

För att förhindra att bränslet avdunstar under försöket måste temperaturen i oljesumpen hållas så låg som möjligt. Det skulle också vara fördelaktigt att försöka samla upp all olja som har passerat cylindrarna, innan den återförs till oljesumpen, och mäta bränslekoncentrationen i oljan. Detta skulle ge ett extra sätt att skatta hur mycket bränsle som har hamnat i oljesumpen under försöket, vilket skulle förbättra mätningens noggrannhet.

I modellen antas att bränsleinflödet är försumbart utom under regenerering. För att säkerställa detta bör även minst ett försök göras där inflödet mäts under normal körning.

När försöken är färdiga anpassas parametern  $D$  i den förbättrade inflödesmodellen (bilaga B) för maximal överrensstämmelse mellan mätdata och beräknade bränsleflöden.

Försöken görs för minst tre olika insprutningsvinklar och för varje vinkel prövas minst två olika insprutningsflöden för att säkerställa modellens giltighet. Vinklarna och flödena bör vara representativa för verklig drift.

### 8.1.2 Försök för att avgöra om en koncentrationsberoende modell är tillräcklig

För att avgöra om det går att bortse från avdunstningstaktens bränslekonzentrationsberoende görs nya, längre försök.

Om det utifrån försöksresultaten ska kunna avgöras om avdunstningen är oberoende av bränslekonzentrationen i oljesumpen under hela oljebytesintervallet borde varje försök vara lika långt som ett maximalt oljebytesintervall. Detta kan dock innebära provlängder på över 1000 h, vilket skulle vara problematiskt eftersom ett antal försök kommer att behövas.

Istället görs lämpligen försök med olika ursprungliga bränslekonzentrations i motoroljan. Minst tre försök bör göras för att säkerställa koncentrationsberoendet. Startkoncentrationerna bör variera så mycket som möjligt inom det intervall som kan förekomma i verklig drift.

I övrigt bör försöken vara identiska, för att filtrera bort alla andra påverkande faktorer. Försöken kan vara relativt korta då det intressanta är jämförelsen av avdunstningstakt dom emellan.

Därefter jämförs avdunstningstakten mellan dom olika försöken. Om skillnaderna dom emellan är små jämfört med modellens noggrannhet är en koncentrationsberoende modell tillräcklig.

### 8.1.3 Längre försök för bestämma avdunstningstaktens temperaturberoende

Ett antal längre försök görs för att avgöra vilket av dom temperaturberoenden som föreslogs i avsnittet "Alternativa modeller" som bäst beskriver avdunstningen. Försöken görs genom att på förväg utspädd olja körs i motorprovcell, temperaturen loggas kontinuerligt och oljeprover, för bestämning av bränslehalten, tas regelbundet. För att minska risken att andra parametrar påverkar resultatet görs minst två försök, med olika temperaturer.

Då försöken är gjorda jämförs dom uppmätta koncentrationerna med resultaten från dom tre föreslagna temperaturberoendena och den modell som ger bäst överrensstämmelse väljs.

### 8.1.4 Försök med förbättrad modell för avdunstat bränsle

En avdunstningsentalpberoende modell kommer att innehålla fler parametrar än den prövade modellen och därmed kommer den även att behöva mer mätdata för att kunna verifieras. Mätningarna görs genom att motorolja, på förhand utspädd med bränsle, körs i provcell medan dess bränsleinnehåll mäts regelbundet. Om möjligt görs mätningarna så att halten av varje modellerad bränslekomponent kan mätas, vilket kommer att innebära en stor ökning av modellens noggrannhet.

Ett antal försök med olika temperaturer i oljesumpen görs varefter parametrarna  $A_j$  i ekvation 7.2 optimeras för maximal överrensstämmelse med mätdata. Ju fler försök som görs desto bättre kommer modellen att bli. Som ett absolut minimum görs tre försök.

## 8.2 Oljedegradering

### 8.2.1 Laborieförsök för att undersöka oljedegraderingens temperaturberoende

Ett antal försök bör göras, i varje försök bör oljan utsättas för en viss konstant temperatur och ett konstant luftflöde under omrörning, för att åstadkomma en jämn oxidation. Minst tre temperaturer bör prövas, för att minska risken att andra faktorer påverkar resultaten. Temperaturerna bör vara jämt utspridda inom hela det temperaturintervall som normalt förekommer i verklig drift.

Det skulle även vara fördelaktigt att pröva några temperaturer utanför det normala intervallet för att på så sätt säkrare kunna avgöra degraderingens funktionella temperaturberoende.

Försöken bör dock inte göras för allt för höga temperaturer, då det finns risk att detta kan ändra degraderingens förlopp, vilket nämndes i avsnittet "Mätdata". För att säkerställa försökens repeterbarhet bör minst två försök göras för varje provkonfiguration. Eftersom det finns flera mått på oljekvalitet är det viktigt att alla kvalitetsindikatorer, TBN, TAN, viskositet och oxidationsgrad, mäts för alla försök.

När dessa försök är gjorda bör det vara möjligt att antingen bekräfta eller förkasta den temperaturmodell som föreslagits i detta examensarbete.

Om temperaturmodellen visar sig vara felaktig är det förhoppningsvis möjligt att, ur mätdata från försöket, konstruera en ny modell som kan användas för resterande försök.

### 8.2.2 Laborieförsök för att undersöka effekten av olika uppvärmningstakt

I den föreslagna degraderingsmodellen, ekv. 4.4, antas att oljans degraderingstakt endast beror temperaturen, inte hur denna varierar. Det finns anledning att tro att snabba temperaturväxlingar skulle vara mer skadliga för oljan än konstanta temperaturer. Ett enkelt sätt att inkludera denna effekt i modellen är att använda olika konstanter  $k_{prop}$  och  $k_{exp}$  för motorns olika zoner.

Det enklaste sättet att avgöra om en sådan förändring av modellen är nödvändig är att göra uppvärmningsförsök i laboratorium. I försöken jämförs degraderingen av olja som hålls vid en jämn hög temperatur med olja som omväxlande kyls av och värms upp.

I verklig drift kommer den högre temperaturen svara mot oljetemperaturen efter kolvkylning. Denna är oftast betydligt högre än temperaturen i oljesumpen och kommer därmed att bidra kraftigt till degraderingen.

För att säkerställa att den förändrade degraderingen orsakats av temperaturväxlingar och inte av en högre medeltemperatur måste en lägre temperatur användas vid dessa försök. Den högre temperaturen väljs lämpligen något högre än sumptemperaturen, och den låga temperaturen väljs något lägre. Temperaturväxlingarna bör ske så snabbt som möjligt för att efterlikna den närmast momentana temperaturökning som sker vid kolvkylningen. Detta

åstadkoms lämpligen genom att oljan sprutas på en uppvärmd metallyta, varefter den samlas upp och kyls ner till den lägre temperaturen så snabbt som möjligt.

Därefter upprepas processen.

Oljeprover bör tas med jämna intervall för dom två olika proverna. Då försöken är färdiga jämförs degraderingen mellan dom två. Minst tre försök med olika temperaturer bör göras.

Eftersom värdet på konstanterna i en zonberoende modell kommer att avgöras av svårmodellerade uppvärmningsförlopp, vars detaljer är okända, bör en sådan modell undvikas om skillnaden mellan dom två modellerna är liten i förhållande till modellens noggrannhet.

### **8.2.3 Laborieförsök för att undersöka oljedegraderingens beroende av blow by**

Försöken som har gjorts indikerar att blow by spelar en avgörande roll för oljans degraderingstakt. För att bestämma degraderingens beroende av blow by bör nya försök göras där denna effekt isoleras från övriga inverkan faktorer.

För att simulera blow by-flöden bör försöken använda uppsamlad blow by från andra motorprover.

Uppsamlingen sker genom att blow by gaserna leds bort från oljesumpen, direkt efter att dom passerat kolvringarna. Därefter leds gasflödet genom en kylare så att dom tyngre komponenterna kondenseras. Det resulterande kondensatet kommer därmed väl representera innehållet i verklig blow by. Under insamlingen av blow by bör det även studeras hur blow by-flödet påverkas av varvtalet, då detta i dagsläget är okänt.

Dom flesta kemiska reaktioners hastighet beror av temperaturen. Därmed finns det anledning att anta att blow by-flödets inverkan på degraderingstakten också påverkas av temperaturen och alltså måste alla försök med blow by göras för ett antal olika oljetemperaturer.

Degraderingstakten kommer dessutom med stor sannolikhet att påverkas av blow by-gasernas sammansättning. Detta avgörs i sin tur av vilket bränsle som används och försök måste därmed göras med olika bränslen.

För att modellen ska vara möjlig att implementera måste detta bränsleberoende modelleras på något mycket enkelt sätt, för att kunna ta hänsyn till den stora mängden olika bränslen på marknaden, utan att kräva orealistiska mängder kalibrering.

Eftersom oljans basinnehåll är den viktigaste indikatorn på oljekvalitet bör bränslets surhetsgrad vara en lämplig indikator på dess effekt på oljedegraderingen. Ett enkelt sätt att inkludera bränslets effekt på degraderingen är därför att vikta blow by-flödet med bränslets surhetsgrad.

Då tillräcklig mängd blow by är insamlad undersöks dess effekt på oljedegraderingen genom att oljeprover under omrörning utsätts för väl kontrollerade flöden av blow by. Försöken bör göras för minst tre olika flöden och för varje flöde bör försök göras med minst tre olika temperaturer.

## 8.2. OLJEDEGRADERING

Försöken bör vara representativa för normala förhållanden. Några siffror på vanliga blow by-flöden finns i dagsläget inte tillgängliga, men även dessa bör representera normalt förekommande värden. Ett lämpligt sätt att åstadkomma detta är att mäta flödet av kondenserad blow by medan den samlas upp och sedan använda detta flöde, ett 20 % högre flöde och ett 20 % lägre flöde vid degraderingsförsöken.

Ur dessa försök bör det vara möjligt att skapa en modell för hur blow by påverkar degraderingen, oberoende av temperaturen och att avgöra om den sammantagna effekten av temperatur och blow by kan modelleras med tillräcklig noggrannhet genom en kombination av dom båda modellerna. Som en första ansats till modell kan den modifierade modellen för oljedegradering ovan (ekv 4.4) användas.

### 8.2.4 Laborieförsök för att undersöka oljedegraderingens beroende av bränsleutspädning

För att det ska vara möjligt att koppla samman modellerna för oljedegradering och bränsleutspädning måste bränsleutspädningens inverkan på oljedegraderingen undersökas. Detta görs lämpligen med laborieförsök. Eftersom innehållet varierar kraftigt mellan olika bränslen bör försöken använda några få bränslen, vars innehåll kan anses representativt för bränslesammansättningen på marknaden.

I försöken späds olja ut med bränsle och utsätts för omrörning vid en typisk oljesumpstemperatur. Kärnen där oljan förvaras bör vara ventilerade för att skapa den anrikning av tyngre bränslekomponenter som typiskt sker i verklig drift. Under försöket tas oljeprov med jämna mellanrum och degraderingen mäts. För att garantera försökens repeterbarhet görs minst två försök för varje bränsle.

Minst tre olika bränslen bör prövas för att avgöra hur mycket bränsletypen påverkar degraderingstakten. För varje bränsle bör minst två försök göras för att säkerställa försökens repeterbarhet. Totalt krävs alltså minst sex försök, om detta antal försök görs kan ett göras med ren diesel, ett med ren FAME och ett med en blandning av lika delar diesel och FAME.

### 8.2.5 Försök i motorprovcell

Om en modell kan skapas som väl beskriver oljedegraderingen i laborieförsöken bör den verifieras i motorprover. Motorproverna bör i likhet med laborieförsöken vara gjorda så att dom olika effekterna går att separera. Först bör ett antal prover göras där blow by-flödet samlas in, innan det når oljesumpen. Dessa försök kommer förhoppningsvis att bekräfta temperaturmodellen från laborieförsöken.

Om temperaturmodellen visar sig giltig måste även blow by-modellen verifieras i provcell. För att kunna åstadkomma varierade och väl kontrollerade blow by-flöden bör, även i dessa försök, motorns egen blow by ledas bort och ersättas med kondenserad blow by från tidigare försök.

Det är viktigt att försöken görs med flera olika motorer för att avgöra om modellens parametrar är allmängiltiga eller motorspecifika.

I en första försöksserie räcker det att använda en motor. Det viktigaste är att modellen testas för ett antal olika temperaturer och med olika blow by-flöden. Minst tre temperaturer och tre olika varvtal bör provas vilket ger totalt minst nio försök.

Om modellen ger bra resultat i den första försöksserien bör den även provas för andra motorer för att säkerställa att den fungerar och för att avgöra om samma parametrar ger bra resultat, eller om modellen måste kalibreras om. För denna försöksserie räcker det att göra två försök per motor, vardera med en unik temperatur och varvtalskombination. Försök bör göras med åtminstone tre motorer.

### **8.2.6 Försök med olika oljor**

Då modellen för oljedegradering är färdig måste den provas på olika oljor för att avgöra om det är möjligt att modellera variationen dom emellan med någon enkel modifikation av modellen. En möjlig sådan modifikation av modellen är införandet av en oljeberoende kvalitetsfaktor som modererar degradingstakten, i likhet med en tidigare föreslagen oljedegenereringsmodell [31].

Modellen bör testas på minst tre olika oljor med olika kvalitetsfaktorer, vardera med minst två temperaturer, innan den implementeras. För att säkerställa försökens repeterbarhet dubbleras några av försöken.



## 8.3 Vattenutspädning

### 8.3.1 Försök för framtagning av nya data för verifiering av modellen

Som en första verifikation av modellen bör det vara tillräckligt med ett fåtal mätningar. Det viktigaste är att mätningarna är gjorda så att modellens olika delar kan varieras separat, vilket avsevärt kommer att förbättra noggrannheten. Detta görs lämpligen genom att kondensatflödena från luftintaget respektive EGR-slingan mäts var för sig. Därmed kan dom modellerade kondensatflödena jämföras direkt med dom faktiska flödena och deras verifikation kommer att vara helt oberoende av dom relativt osäkra mätningarna av vattenkoncentrationen i oljesumpen.

Mätning av vattenkoncentrationen i oljesumpen kommer endast att behövas för verifiering av modellen för vattnets avdunstning och optimering värdet på modellparametern, A (ekv 4.15).

Det måste säkerställas att modellen är giltig för alla förhållanden som normalt förekommer i verklig drift. Alltså måste motorns luft- bränsleförhållande, temperaturen i oljesumpen, EGR-slingan och luftintaget, och trycken i EGR-slingan samt luftintaget variera över hela det intervall över vilket dom varierar i verklig drift. Speciellt viktigt är att trycken varierar eftersom dom har störst inverkan på mängden kondensat.

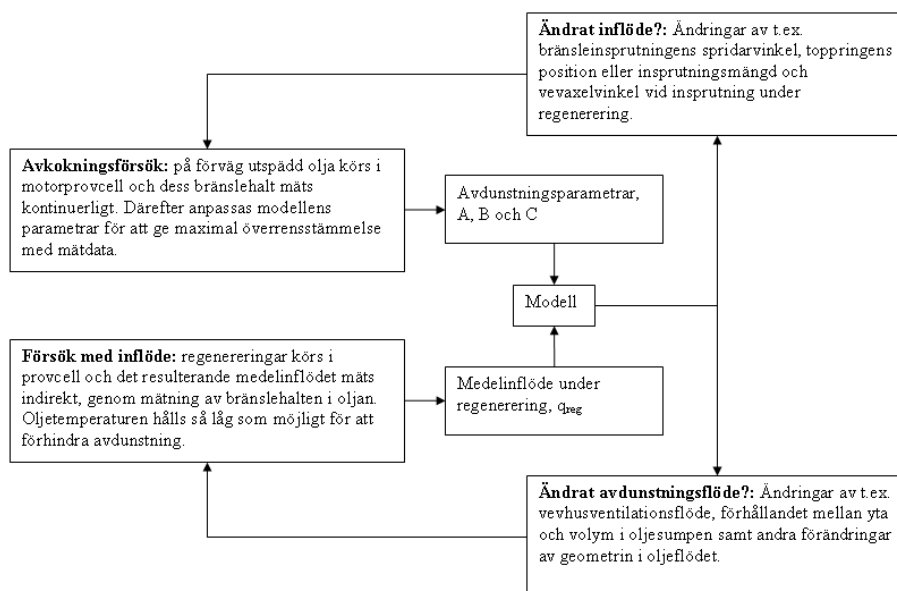
Minst tre olika försök bör göras, med olika last- varvtalskombinationer, vilket kommer att ge upphov till olika tryck och temperaturer i luftintag respektive EGR-slinga och olika luft- bränsleförhållanden och kylvätsketemperaturer, vilket kommer att påverka temperaturen i oljesumpen. För att kontrollera försökens repeterbarhet bör minst ett av försöken upprepas, vilket ger sammantaget minst fyra försök.

Om t.ex. tre försök görs bör dom göras så att modellens variabler vid ett av försöken ligger nära sitt maximala värde, vid ett andra nära sitt minimala värde och vid ett sista i mitten av intervallet.



## Bilaga A

# Flödesschema för kalibrering av bränsleutspädningsmodellen



Figur A1.1: Modellen för avdunstningsflödet kalibreras genom avkokningsförsök. Dess parametrar måste uppdateras efter varje ändring som kan ha påverkat avdunstningstakten. Modellen för inflödet baseras på ett medelinflöde under regenerering. Medelflödet måste mätas på nytt vid varje ändring av motorn eller styrningen av regenereringen som kan ha påverkat inflödet.

### Kalibrering av avdunstningsmodell

Kalibrering av avdunstningsmodellen görs genom avkokningsförsök. Motorolja, på förväg utspädd med bränsle körs i provcell medan oljetemperaturen mäts kontinuerligt och oljeprov tas med jämna mellanrum.

Minst tre försök med olika oljetemperatur måste göras. Temperaturerna bör vara väl åtskiljda och representativa för typiska temperaturer vid drift. Om tre försök görs är t.ex. 70, 90 och 110°C lämpliga temperaturer.

## BILAGA A. FLÖDESSCHEMA FÖR KALIBRERING AV BRÄNSLEUTSPÄDNINGSMODELLEN

### Kalibrering av inflödesmodell

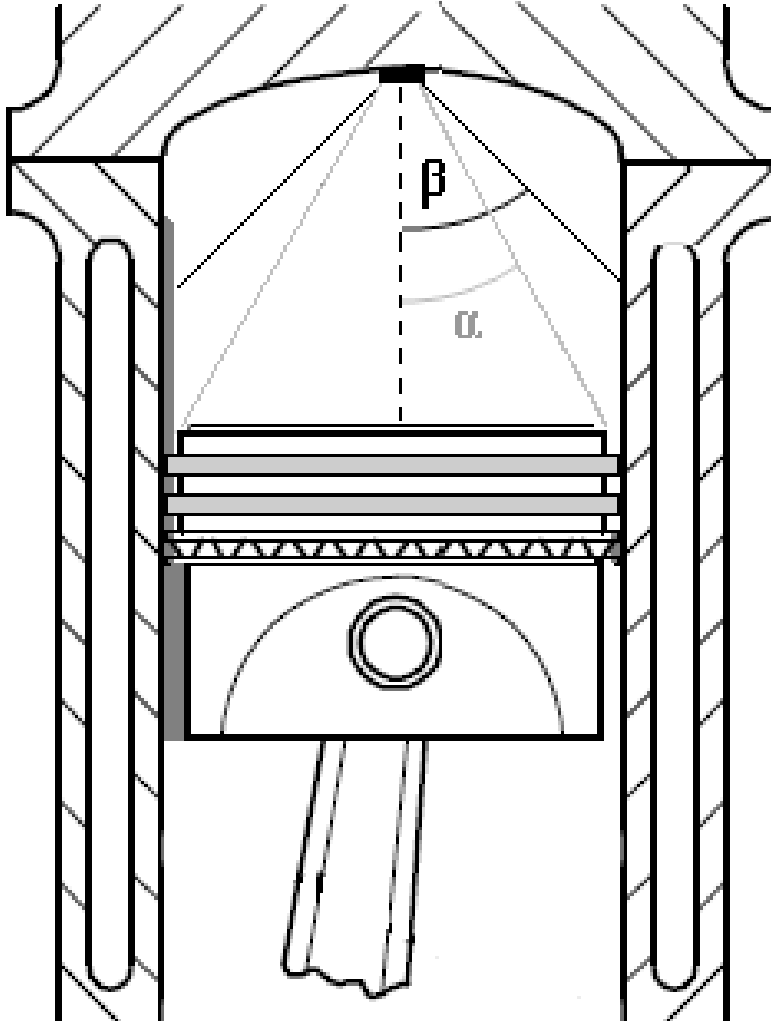
Kalibrering av inflödesmodellen görs genom mätning av medelinflödet. Försöken görs i provcell, ett antal regenereringar görs och oljeprover tas med jämna mellanrum. För att minska effekten av avdunstning hålls oljetemperaturen så låg som möjligt.

## Bilaga B

# Framtida förbättrad modell

Den föreslagna bränsleinflödesmodellen baseras på ett genomsnittsinflöde vid regenerering av efterbehandlingssystemet. En sådan modell kommer inte att fungera särskilt väl om förutsättningarna under regenerering tillåts variera. En förbättring vore att låta modellen räkna fram inflödet av bränsle utifrån kända storheter.

Andelen bränsle som träffar cylinderväggen beräknas först utifrån vinklarna  $\alpha$  och  $\beta$  i figuren nedan.



Figur A2.1: Cylinderns geometri, vinkeln  $\alpha$  beror av motorns geometri och av vevaxelvinkeln, spridningsvinkeln  $\beta$  är en motorparameter.

Bränsleinsprutningen sprider det insprutade bränslet med en vinkel  $\beta$ . Av denna vinkel upptar kolven vinkeln  $\alpha$ . Om fördelningen av insprutat bränsle,  $f$ , tillåts variera över hela vinkelintervallet kommer andelen  $k$  att sändas ut i riktning mot oljefilmen,

$$k(\theta, \phi) = 1 - \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\alpha \sin(\phi) d\phi f(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\beta \sin(\phi) d\phi f(\theta, \phi)} \quad (\text{B.1})$$

där vinkeln  $\beta$  är en motorparameter och  $\alpha$  kommer att bero av vevaxelvinkeln och cylinderns geometri.

Andelen bränsle som träffar väggen begränsas också av det insprutade bränslets hastighet, vilket i sin tur avgörs av railtrycket, och tätheten hos cylindergaserna som bränslet måste passera innan det når fram till väggen vilket avgörs av

cylindertrycket.

Bränslets hastighet då det lämnar bränsleinsprutningen kan beräknas med Bernoullis ekvation [36], under antagandet att termiska effekter är försumbara och att flödet är inkompressibelt.

$$\nabla\left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + \Omega\right) = 0 \quad (\text{B.2})$$

där  $v$  är bränslets hastighet,  $\rho$  är dess densitet,  $p$  är trycket och  $\Omega$  är den potentiella energin, som kan försummas. Detta ger bränslets hastighet vid cylinderns inlopp till,

$$v_{cyl} = \sqrt{v_{inspr}^2 + \frac{2}{\rho}(p_{inspr} - p_{cyl})} \quad (\text{B.3})$$

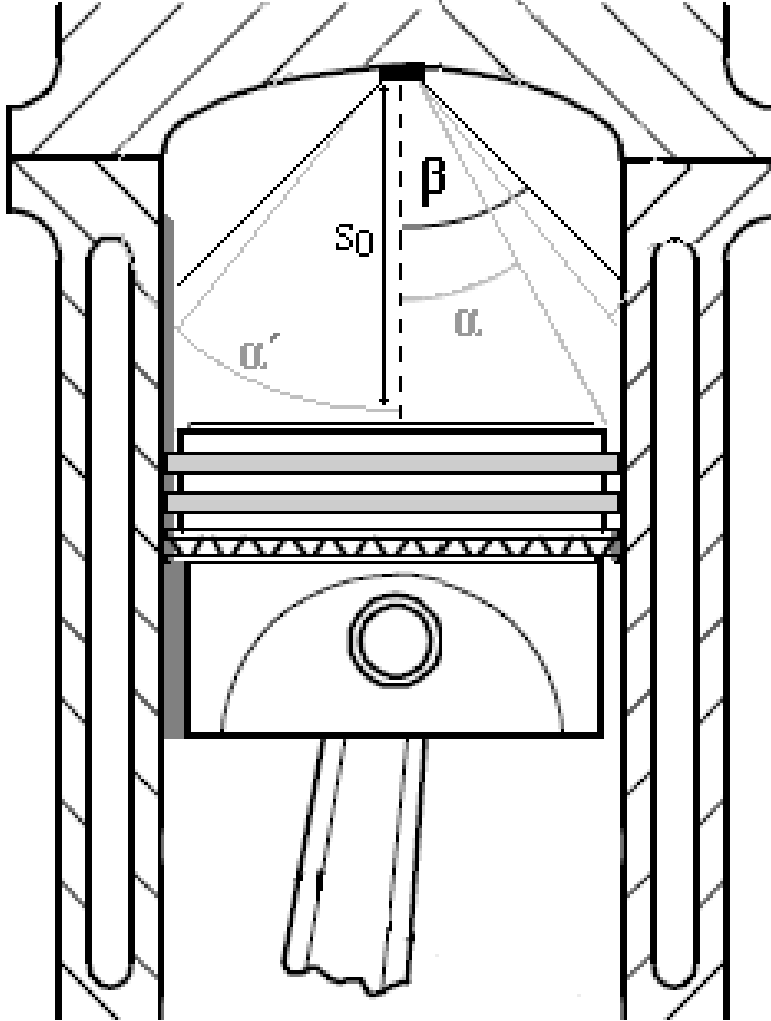
där  $v_{inspr}$  och  $p_{inspr}$  är bränslets hastighet respektive tryck i insprutningen och  $v_{cyl}$  och  $p_{cyl}$  är dess hastighet och tryck vid inloppet till cylindern.

Bränslesprayens räckvidd beror av denna hastighet och av tätheten hos gaserna i cylindern. En beskrivning av detta beroende ges av följande uttryck,

$$s = \frac{1}{(\rho_g/\rho)^{1/4}} \sqrt{\frac{2v_{cyl}rt}{\tan(\beta)}} \quad (\text{B.4})$$

där  $s$  är sträckan som bränslesprayen färdas under tiden  $t$ ,  $\rho_g$  är cylindergasernas densitet och  $r$  är insprutningsmunstyckets radie.

Om det antas att allt bränsle som ännu inte träffat väggen efter en viss tid  $t_0$  antingen förbränns eller lämnar cylindern med avgaserna kommer andelen bränsle som träffar väggen att modifieras enligt nedanstående,



Figur A2.2: Rail- och insprutningstryckens inverkan på andelen bränsle som träffar cylinderväggen,  $s_0$  är den sträcka som bränslet hinner på tiden  $t_0$  och  $\alpha'$  är motsvarande vinkel.

Sammantaget fås andelen bränsle som träffar väggen av,

$$k' = 1 - \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\alpha'} \sin(\phi) d\phi f(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\beta} \sin(\phi) d\phi f(\theta, \phi)} \quad (\text{B.5})$$

där vinkeln

$$\alpha' = \max\left[\text{Arctan}\left(\frac{r_{cyl}}{h}\right), \text{Arcsin}\left(\frac{r_{cyl}}{s_0}\right)\right] \quad (\text{B.6})$$

där  $r_{cyl}$  är cylinderradien och  $h$  är avståndet mellan kolven och insprutningsmunstycket, vilka beror av vevaxelvinkeln. Sträckan  $s_0$  ges av,

$$s_0 = \frac{1}{(\rho_g/\rho)^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{2v_{cyl}rt_0}{\tan(\beta)}} \quad (\text{B.7})$$



Modellen kan förenklas kraftigt om det antas att insprutningen är jämnt fördelad över hela spridarvinkeln. Därmed blir fördelningsfunktionen,  $f$ , i ekvation B.1 konstant lika med ett och integralerna kan lösas explicit, med resultatet,

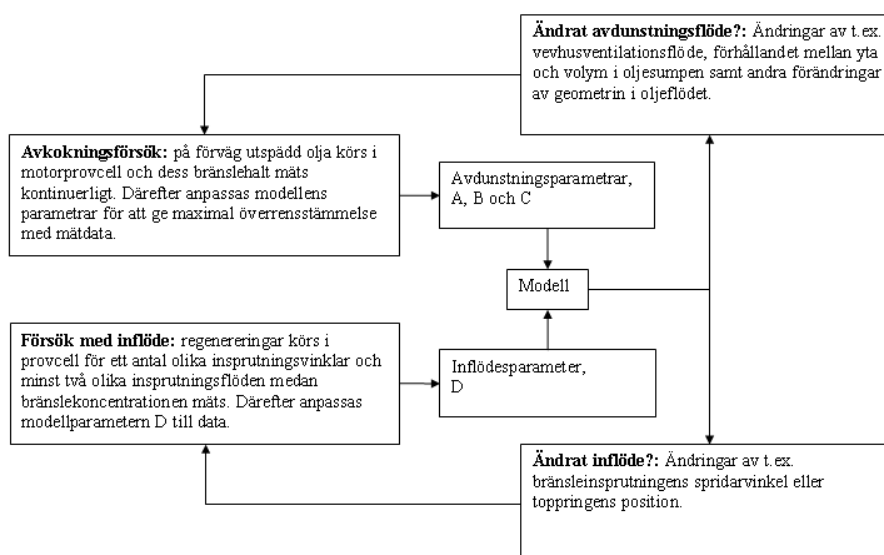
$$k' = \frac{\cos(\alpha') - \cos(\beta)}{1 - \cos(\beta)} \quad (\text{B.8})$$

Om det antas att en viss konstant andel av bränslet som träffar oljefilmen,  $D$ , tas upp av oljefilmen så blir det resulterande bränsleinflödet,

$$q_{In} = D \cdot k'(\theta_{Vev}, p_{Inspr}, p_{Cyl}) \cdot q_{Reg} \quad (\text{B.9})$$

där  $\theta_{Vev}$  är vevaxelvinkeln och  $q_{Reg}$  är bränsleflödet vid regenerering. Parametrarna  $D$  och  $t_0$  bestäms experimentellt.

Den förbättrade modellen för bränsleinflöde kalibreras enligt följande,



Figur A2.3: Den förbättrade inflödesmodellen kalibreras genom motorförsök. Försök görs med ett antal olika insprutningsvinklar och minst två olika bränsleflöden varefter parametern  $D$  optimeras för maximal överensstämmelse med mätdata.

## Kalibrering av förbättrad inflödesmodell

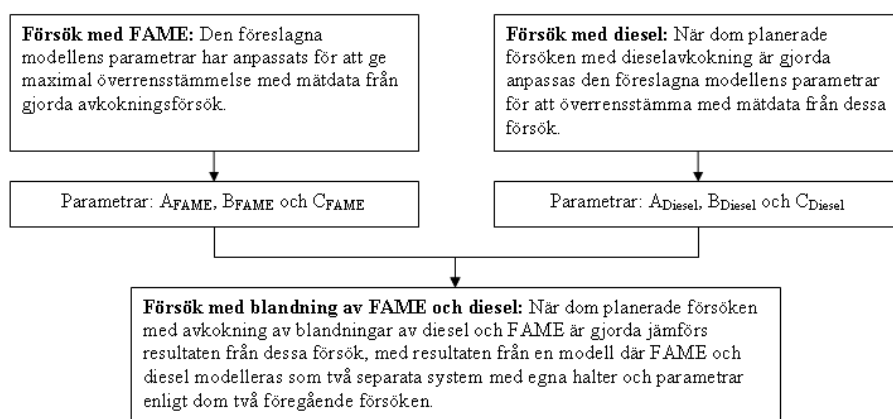
Kalibrering av den förbättrade inflödesmodellen görs genom försök i provcell. I varje försök görs ett antal regenereringar och oljeprover tas med jämna mellanrum. För att minska effekterna av avdunstning hålls oljetemperaturen så låg som möjligt.

Försöken görs för minst tre olika insprutningsvinklar, vardera med minst två olika insprutningsflöden, för att säkerställa modellens giltighet. När försöken är gjorda anpassas modellens konstant  $D$  så att överensstämmelsen mellan beräknade och mätta bränsleinflöden maximeras.



## Bilaga C

# Flödesschema för skapandet av modell för blandningar av FAME och diesel



*Figur A3.1: Modellen har jämförts med avkokningsförsök med ren FAME. Försök med ren diesel och med blandningar av FAME och diesel är planerade. Då dessa försök är gjorda bör modellen först jämföras med ren FAME. Därefter bör det prövas att modellera blandningar av FAME och diesel med en modell där FAME och diesel modelleras som två separata system.*

### Försök för skapande av modell för blandningar av diesel och FAME

För att skapa en modell för blandningar av diesel och FAME krävs nya försök. Försöken görs genom att motorolja, på förväg utspädd med bränsle, körs i motorprovcell medan oljesumttemperaturen loggas kontinuerligt och oljeprover tas med jämna mellanrum.

I en första försöksserie görs försök med ren diesel. Försök måste göras för minst tre olika oljetemperaturer med så stor spridning som möjligt för att skillnaden mellan olika temperaturer ska framgå så tydligt som möjligt. Om tre försök görs är t.ex. 70, 90 och 110°C lämpliga temperaturer.

Då försöken är gjorda anpassas modellens parametrar, A, B och C, så att maximal överensstämmelse mellan mätdata och modellresultat uppnås. Eftersom diesel är

## BILAGA C. FLÖDESSCHEMA FÖR SKAPANDET AV MODELL FÖR BLANDNINGAR AV FAME OCH DIESEL

mer lättflyktigt än FAME kommer detta antagligen resultera i andra  
parametervärden än försöken med FAME.

Om modellen väl beskriver avkokningen av ren diesel görs försök med blandningar  
av FAME och diesel. Försök görs med minst två olika blandningar och minst två  
olika temperaturer per blandning, alltså totalt minst fyra försök. Det är viktigt att  
halterna av dom två bränslena och temperaturerna varierar inom dom intervall  
som normalt förekommer.

Lämpliga temperaturer är t.ex. 80 och 100°C och lämpliga halter är 1/3 respektive  
2/3 FAME, om totalt fyra försök görs.

## Bilaga D

# Variabellista

### D.1 Bränsleutspädning

Parameter	Beskrivning	Enhet
$A$	Modellparameter, avdunstningstakt	$lh^{-1}K^{-1}$
$B$	Modellparameter, linjärt beroende av andel dunstat bränsle	–
$C$	Modellparameter, kvadratisk beroende av andel dunstat bränsle	–
$c$	Bränslekonzentration	–
$m_+$	Påfylld oljemängd	$l$
$m_{Bransle}$	Aktuell bränslemängd i oljan	$l$
$m_i$	Bränslemängd i bränsleelement $i$	$l$
$m_{lackage}$	Läckt oljemängd	$l$
$m_{olja}$	Aktuell oljemängd	$l$
$m_{tot}$	Aktuell mängd olja och föroreningar	$l$
$q_{reg}$	Bränsleinflöde under regenerering	$lh^{-1}$
$x_i$	Andel avdunstat bränsle i element $i$	–
$T$	Temperatur i oljesumpen	$K$
$T_{ref}$	Referenstemperatur	$K$
$\Delta t$	Tidsintervall för ODE-lösning	$h$

## D.2 Oljedegradering

Parameter	Beskrivning	Enhet
$c$	Modellparameter, linjärt beroende av blow by	$TBNh^{-1}$
$k_{exp}$	Modellparameter, exponentiellt temperaturberoende	$K$
$k_{prop}$	Modellparameter, skalning	$TBNh^{-1}l^{-1}$
$m_{Bas}$	Mängd baser i oljan	$l$
$m_{Lackage}$	Läckt oljemängd	$l$
$m_{Olja}$	Aktuell mängd olja	$l$
$m_+$	Påfylld Oljemängd	$l$
$N$	Varvtal	$min^{-1}$
$q_i$	Oljeflöde genom zon i	$lmin^{-1}$
$T_i$	Temperatur i zon i	$K$
$T_{Kolv}$	Oljetemperaturen i kolvkylningen	$K$
$T_{sump}$	Oljetemperaturen i oljesumpen	$K$
$T_{Turbo}$	Oljetemperaturen i turboaggregatet	$K$
$t_i$	Genomflödestid i zon i	$min$
$\Delta q_{BB}$	Relativt blow by-flöde	$lh^{-1}$
$\Delta t$	Tidsintervall för ODE-lösning	$h$

## D.3 Oljesotbildning

Parameter	Beskrivning	Enhet
$c_{Sot}$	Sotkoncentration	–
$m_{Lackage}$	Läckt oljemängd	$l$
$m_{Olja}$	Aktuell oljemängd	$l$
$m_{Sot}$	Aktuell sotmängd	$l$
$m_+$	Påfylld oljemängd	$l$
$N$	Varvtal	$min - 1$
$P_R$	Railtryck	$Pa$
$\Delta t$	Tidsintervall för ODE-lösning	$h$
$\theta$	Vevaxelvinkel	$^\circ$

## D.4 Vattenutspädning

Parameter	Beskrivning	Enhet
$A$	Modellparameter, avdunstningstakt	$lK^{-1}h^{-1}$
$c_{H_2O}$	Luftens vattenhalt	—
$c_{H_2O}^{(g)}$	Koncentration av gasformigt vatten	—
$c_{H_2O,Ut}$	Vattenkoncentration i oljan	—
$k_{EGR}$	EGR-halt	—
$k_g$	Andel vatten i gasform	—
$m$	Antal kolatomer per bränslemolekyl	—
$m_{H_2O}$	Aktuell vattenmängd i oljan	$l$
$m_{Lackage}$	Läckt oljemängd	$l$
$m_{Olja}$	Aktuell oljemängd	$l$
$m_{tot}$	Aktuell mängd olja och föroreningar	$l$
$m_+$	Påfylld oljemängd	$l$
$n$	Antal väteatomer per bränslemolekyl	—
$P_{EGR}$	Tryck i EGR-slingan	$Pa$
$P_{Ang,EGR}$	Vattnets ångtryck i EGR-slingan	$Pa$
$P_{Ang,Intag}$	Vattnets ångtryck i luftintaget	$Pa$
$q_{Bransle}$	Bränsleinflöde till motorn	$lmin^{-1}$
$q_{H_2O}$	Totalt kondensatflöde	$lmin^{-1}$
$q_{H_2O,EGR}$	Kondensatflöde från EGR-slingan	$lmin^{-1}$
$q_{H_2O,Intag}$	Kondensatflöde från luftintaget	$lmin^{-1}$
$q_{Luft}$	Luftinflöde till motorn	$lmin^{-1}$
$T$	Oljetemperatur i oljesumpen	$K$
$T_{EGR}$	Temperatur i EGR-slingan	$K$
$T_{Intag}$	Temperatur i luftintaget	$K$
$\Delta t$	Tidsintervall för ODE-lösning	$h$
$\lambda$	Relativt luft- bränsleförhållande	—

## D.5 Temperaturmodeller

Parameter	Beskrivning	Enhet
$c_{cyl}$	Cylindrarnas specifika värmekapacitet	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$c_{olja}$	Oljans specifika värmekapacitet	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$k_{cyl-H_2O}$	Värmeöverföringskonstant, olja – kylvätska	$JKmin^{-1}$
$k_{cyl-olja}$	Värmeöverföringskonstant, cylindrar – olja	$JKmin^{-1}$
$k_{olja-H_2O}$	Värmeöverföringskonstant, olja – kylvätska	$JKmin^{-1}$
$k_{olja-omg}$	Värmeöverföringskonstant, olja – omgivning	$JKmin^{-1}$
$m_{cyl}$	Cylindrarnas massa	$kg$
$m_{olja}$	Oljans massa	$kg$
$q_{cyl-H_2O}$	Värmefflöde, cylindrar – kylvätska	$Jmin^{-1}$
$q_{cyl-olja}$	Värmefflöde, cylindrar – olja	$Jmin^{-1}$
$q_{avg}$	Värmefflöde, avgaser	$Jmin^{-1}$
$q_{in}$	Totalt energiinflöde	$Jmin^{-1}$
$q_{olja-H_2O}$	Värmefflöde, olja – kylvätska	$Jmin^{-1}$
$q_{olja-omg}$	Värmefflöde, olja – omgivning	$Jmin^{-1}$
$q_{turbo}$	Värmefflöde från turboaggregat	$Jmin^{-1}$
$q_{turbo}^{(m)}$	Oljemassflöde genom turboaggregat	$kgmin^{-1}$
$q_{cyl-olja}^{(m)}$	Oljemassflöde genom kolvkylning	$kgmin^{-1}$
$T_{cyl}$	Cylindertemperatur	$K$
$T_{H_2O}$	Kylvätsketemperatur	$K$
$T_{olja}$	Oljetemperatur	$K$
$T_{omg}$	Omgivningstemperatur	$K$
$T_{kolvkylning}$	Oljetemperatur efter kolvkylning	$K$
$W$	Motorns uteffekt	$Jmin^{-1}$
$\Delta t$	Tidsintervall för ODE-lösning	$min$
$\Delta T_{Sump-Turbo}$	Temperaturskillnad, sump – turboaggregat	$K$



## Bilaga E

### Förkortningar

BMEP	Brake Mean Effective Pressure, är mängden arbete som motorn utför på vevaxeln under en cykel dividerat på motorns cylindervolym. Detta är ett mått på mängden utfört arbete som skalar bort beroendet på motorstorlek.
EGR	Exhaust Gas Recirculation, är en teknik för minskning av skadliga utsläpp. En viss del av avgaserna blandas med luften som tas in i motorn vilket sänker förbrännings-temperaturen och mängden tillgängligt syre. Detta minskar halten av NO <sub>x</sub> i avgaserna.
FAME	Fatty Acid Methyl Ester, vanligen känt som biodiesel, är ett samlingsnamn för bränslen som tillverkas med utgångspunkt i vegetabiliska oljor. FAME används antingen rent eller blandat med vanlig diesel.
HOP	High Oxidative Performance, olja med speciella oxidationshämmande tillsatser
LOP	Low Oxidative Performance, normal olja utan speciella oxidationshämmande tillsatser
OIT	Oxidative Induction Time, är ett mått på halten antioxidanter i oljan. Oljeprovet utsätts för en konstant oxiderande omgivning och tiden tills oljans antioxidanter uttömts och en kraftigt exoterm oxidering börjar mäts med kalorimetriska metoder.
TAN	Total Acid Number, är den totala mängden syra i oljan, mätt som ekvivalent mängd kaliumhydroxid per gram olja.
TBN	Total Base Number, är den totala mängden baser i oljan, mätt som ekvivalent mängd kaliumhydroxid per gram olja.
WHTC	World Harmonized Transient Cycle, är en testcykel utarbetad för certifiering av emissionsnivåer. En viss specificerad vägprofil och hastighet räknas om till varvtal och last med hjälp av en modell för ett standardfordon. Därefter kan dom framräknade värdena användas för försök i motorprovcell.



# Litteraturförteckning

- [1] Lacey, P., Gunsel, S., Ferner, M., Pozebanchuk, M. och Alim, A., *"Effect of Oil Drain Interval on Crankcase Lubricant Quality"*, SAE-2003011957
- [2] Meyerdierks, D. Pickert, D. Hartmut, H., och Sötler, H., *"Device and method for calculating and displaying service intervals"*, EP 086 3490 (A2)
- [3] Imajo, M., Kawakita, T., *"Oil Degradation Warning System"*, US 4 706 193
- [4] Pickert, D., Schumacher, V., Slter, H. och Vltz, M., *"Method and Device for Monitoring and/or Determining Motor Oil Quality"*, US 6 732 572
- [5] Andreae, M., Fang, H. och Bhandary, K., *"Biodiesel and Fuel Dilution of Engine Oil"*, SAE 2007 01 4036
- [6] Belloir, M., Sakushima, N. och Lahjaily, H., *"A CFD Study to Optimize the Injection Strategy for Diesel Particulate Filter Regeneration"*, SAE 2007 01 0164
- [7] Shayler, P., Winborn, L. och Scarisbrick A., *"Fuel transport to the crankcase, oil dilution and HC return with breather flow during the cold operation of a SI engine"*, SAE 2000 01 2838
- [8] Shayler, P., Winborn, L. och Scarisbrick A., *"The build-up of oil dilution by gasoline and the influence of vehicle usage pattern"*, SAE 2000 01 1235
- [9] Sagawa, T., Fujimoto, H. och Nakamura, K., *"Study of fuel dilution in direct-injection and multipoint-injection gasoline engines"*, SAE 2002 01 1647
- [10] Leet, J., Friesen, T. och Shadbourne, A., *"EGR's effect on oil degradation and intake system performance"*, SAE 98 01 79
- [11] Gao, H., *"Laboratory Thermal Oxidation Study on Axle Gear Lubricants"*, SAE 2006 01 3269
- [12] Gautam, M., Chitoor, K., Balla, S. och Keane, M., *"Contribution of soot-contaminated oils to wear, Part II"*, SAE 1999 01 1519
- [13] Personlig kommunikation, Leif Hansson, NMED, 2010-09-02
- [14] J. W. Girard, L. D. Gratz, J. H. Johnson, S. T. Bagley och D. G. Leddy, *"A Study of the Character and Deposition Rates of Sulfur Species in the EGR Cooling System of a Heavy-Duty Diesel Engine"*, SAE 1999 01 3566

## LITTERATURFÖRTECKNING

- [15] J. Hoard, M. Abarham, D. Styles, J. Giuliano, C. Sluder och J. Storey, "*Diesel EGR Cooler Fouling*", SAE 2008-01-2475
- [16] G. Bourgoïn, E. Tomas, J. Lujan och B. Pla, "*Acidic Condensation in HP EGR Systems Cooled at Low Temperature Using Diesel and Biodiesel Fuels*", SAE 2010 01 1530
- [17] Ståhle, K., "*Påverkan av stillastående intern HC-dosering på grundmotorn*", Technical Report 7004529
- [18] Rindeström, C., "*Avkokning-FAME*", Scania protokoll, nr. 7229001 och 7229002
- [19] Cork J.M., "*Heat, 2nd Edition*", John Wiley & Sons, Inc., 2007, s. 198
- [20] "*Journal of Chemical Education*", Vol 55 s. 369-371
- [21] Ameye J., Kauffman R.E., "*Lubricant Health Monitoring Programs - A Proactive Approach to Increase Equipment Availability*", SAE-2005013599
- [22] Gao, H., "*Laboratory Thermal Oxidation Study on Axle Gear Lubricants*", SAE 2006 01 3269
- [23] Personlig kommunikation, Mattias Berger, NMBO, 2010-12-20
- [24] Udo, J., "*Långtidsprov: Långtidsprov: DC1213-6318078, Special Oljedegenerering, 0h-1288h*", Scania M68/581
- [25] Okuyama Y., Aikawa K., Houshikawa W., Maruyama M., "*Development of Engine Oil Deterioration Monitoring System Using Estimation Method of Oxidation Induction Time*", SAE-2007014091
- [26] Leet J., Friesen T., Shadbourn A., "*EGR's Effect on Oil Degradation and Intake System Performance*", SAE-980179
- [27] Rejnö, K., "*NMEC Oljesotkurva*", Scania M81/154
- [28] Personlig kommunikation, Leif Hansson, NMED, 2010-11-26
- [29] Rindeström, C., "*Kall EGR*", Scania protokoll nr. 19205851, 19205877, 19205893.1 2 3 och 19205903
- [30] Personlig kommunikation, Johan Glaumann, NMGG, 2011-01-11
- [31] Berger, M., "*Instruction: Engine Oil Degradation Model for CBM*", Technical Product Data 2009754
- [32] Hartnett, J. P., "*Transport phenomena in materials processing*", Academic Press, 1996, s. 127
- [33] E-postkonversation med M. Berger, NMBO, 2010-11-04

## LITTERATURFÖRTECKNING

- [34] Obiols, J., "*Lubricant Oxidation Monitoring Using FTIR Analysis – Application to the Development of a Laboratory Bulk Oxidation Test and to In-Service Oil Evaluation*", SAE-2003-01-1996
- [35] Behrooz, K., Kaleli, H., Perez, J.M., "*Oxidation Stability of Some Phosphorus – Free Fully Formulated Crankcase Oils*", SAE-982581
- [36] Granger, R. A., "*Fluid Mechanics*", Dover Productions Inc., 1995, s.200
- [37] Sazhin, S., Crua, C., Hwang, J., No, S. och Heikal, M., "*Models of spray penetration*", Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering", Juni 2002, nr. 11-5 s. 156