



Förstudie: modellering av vegetationsbränder

Rickard Hansen

MSBs kontaktpersoner:

Thomas Degeryd, 010-240 51 35

Leif Sandahl, 010-240 53 12

Ulrika Postgård, 010-240 50 33

Publikationsnummer MSB 0160-10

ISBN 978-91-7383-074-4

Sammanfattning

Det finns för närvarande ingen modell för vegetationsbränder som är specifikt för svenska förhållanden, bara ett brandriskprognossystem (FWI).

Efterfrågan på en modell för vegetationsbränder har inte tidigare varit stort i Sverige, men de klimatförändringar som nu sker ökar risken för stora och intensiva vegetationsbränder. Behovet av ytterligare och bättre verktyg för bedömning av vegetationsbränder kommer att vara mycket efterfrågade i framtiden.

Denna förstudie syftar till att:

- Redovisa vad som har gjorts inom området modellering av vegetationsbränder under tidigare år och främst de senaste tjugo åren.
- Att ge rekommendationer om det fortsatta arbetet med att utveckla en svensk modell för vegetationsbränder.

Metoden som användes under studien var litteratur- och artikelinventering. Studien ser också till erforderlig data för en modell för vegetationsbränder och de indata som finns tillgängliga just nu. Denna fråga är mycket viktig eftersom kvaliteten på utdatan från en modell för vegetationsbränder är beroende på kvaliteten på indata.

Under studien konstruerades och förfinades även en primitiv modell för vegetationsbränder. Syftet var att få en inblick i komplexiteten och problemen med att utveckla en fungerande modell.

Följande indelning av modeller för vegetationsbränder är allmänt vedertagen:

- Statistiska modeller; grundas främst på statistik från tidigare inträffade vegetationsbränder eller testbränder. De involverar inte fysikaliska processer i något avseende.
- Semi-empiriska modeller; baseras på fysikaliska lagar, men med en enkel modell förstärkt med empiriska faktorer. Ofta görs t.ex. ingen skillnad mellan de tre olika värmeöverföringsmekanismerna ledning, konvektion eller strålningvärme.
- Fysikaliska modeller: baseras på fysikaliska lagar. Här skiljer man mellan de tre olika fysikaliska mekanismerna för värmeöverföring.

De statistiska modellerna involverar inte fysikaliska processer - de är endast statistiska beskrivningar av testbränder. Att det saknas en fysikalisk grund betyder att statistiska modeller måste användas med stor försiktighet utanför de förhållanden som de verifierats för.

De semi-empiriska modellerna baseras ofta på principen om energins bevarande. En semi-empirisk modell är oftast inte beräkningsintensiv. De innehåller variabler som i allmänhet är lätt att mäta ute i terrängen. Trots de problem som existerar med begränsad precision, gör modellernas snabbhet och enkelhet dem användbara för operativ användning.

De fysikaliska modellerna har den fördelen att de är baserade på kända fysikaliska förhållanden. Därmed underlättas deras användning utanför området som de testats för. Således kan vi förvänta oss att fysikaliska modeller skulle ge de mest exakta prognoserna och ha största användbarhet. Men arbetet med fysikaliska modeller lider exempelvis av brist på förståelse av flera fysikaliska processer såsom karakterisering av de kemiska processer som äger rum vid förbränning, flammors egenskaper och kvantifiering av fysikaliska processer som reglerar värmeöverföringen.

De indata som finns tillgängliga idag är i allmänhet inte tillräckligt utförliga för användning i fysikaliska modeller. Som ett resultat kommer en mycket detaljerad fysikalisk modell fortfarande bara ge oprecisa prognoser. Allt eftersom bättre och mer detaljerad indata kommer att finnas tillgänglig, kommer användning av fysikaliska modeller att bli mer motiverad.

En semi-empirisk modell rekommenderas att utvecklas i Sverige. Denna slutsats grundar sig på följande faktorer:

- Precisionen i en semi-empirisk modell är i allmänhet mycket bättre än för en statistisk modell. Dessutom är det område där modellen är användbar mycket större.
- Den mängd arbete som krävs för att utveckla en semi-empirisk modell kommer inte att skilja sig mycket från den mängd arbete som krävs för en statistisk modell. I båda fallen kommer ett antal testbränder att behöva genomföras för att definiera och kalibrera ett antal bränslemodeller representativa för Sverige.
- För närvarande är prestanda och tillämpning av fysikaliska modeller inte på en acceptabel nivå (till följd av exempelvis den komplexitet som modellen innebär och den datorkraft som finns hos de flesta datorer i dag) för operativ användning.

Den svenska semi-empiriska modellen ger sannolikt bäst resultat för svenska förhållanden om den byggs från grunden baserat på svenska förhållanden (typ av vegetation och klimat i Sverige), i stället för att försöka bygga in lokala svenska förhållanden i en befintlig modell.

Ett system för bättre indata – väder- och bränsledata - bör också arbetas med. Detta kunde exempelvis dra nytta av resultaten av det mycket lovande "Alarm"-projektet som bedrivs i västra delen av Sverige.

När det gäller frågan om bättre bränsledata, ny teknik för satellit- eller flygbilder samt bildtolkningsteknik måste dessa områden övervakas, då ett stort problem som måste lösas är att kunna skilja mellan bränslet ovanför marken och markbränslet.

Förord

Denna uppsats utgör examensarbetet som skall genomföras vid magisterprogrammet i matematisk modellering och simulering vid Blekinge Tekniska Högskola.

Jag vill tacka alla som har bidragit till detta projekt. De personer som jag särskilt skulle vilja tacka är:

- Håkan Lennerstad (Blekinge Tekniska Högskola), i egenskap av min handledare under senare skeden av min avhandling.
- Efraim Laksman (Blekinge Tekniska Högskola), som hjälpte mig med MATLAB programmeringen.
- Leif Sandahl (Räddningsverket), som gav mig värdefulla synpunkter under mitt arbete med min uppsats.
- Thomas Degeryd (Räddningsverket), som gav mig värdefulla synpunkter under mitt arbete med min uppsats.

Kalmar, april 2008

Rickard Hansen

Innehållsförteckning

1. Inledning	7
2. Bakgrund	8
2.1 Vegetationsbränder	8
2.2 Beslutstöd före, under och efter en vegetationsbrand.....	9
2.3 Det svenska brandriskprognossystemet	10
3. Metod	12
3.1 Litteratur- och artikelinventering.....	12
3.2 Fysikalisk modell	13
3.3 MATLAB	13
4. Modellering av vegetationsbränder.....	14
4.1 Modellering av vegetationsbränder i allmänhet.....	14
4.2 Statistiska modeller	16
4.2.1 FBP-systemet.....	17
4.2.2 McArthurs modell	19
4.3 Semi-empiriska modeller	20
4.3.1 Rothermels modell (1972).....	20
4.3.2 BEHAVE och FARSITE.....	22
4.3.3 Van Wagners toppbrandsmodell och spridningsmodeller (1977)	22
4.4 Fysikaliska modeller	23
4.4.1 Albin (1986).....	24
4.4.2 Kopplad atmosfär-brand-modell	24
4.4.3 Multifasmodeller	25
4.5 Tillgänglig indata	30
4.5.1 Väder.....	30
4.5.2 Topografi	31
4.5.3 Bränsle.....	31
5. En enkel fysikalisk modell.....	33
5.1 Initial modell.....	33
5.2 Tredimensionell modell	35
5.2.1 Variation av bränslets specifika värme	37
5.2.2 Spridningshastigheten över tiden.....	38
5.2.3 Flammans lutning på grund av vindpåverkan.....	39
5.2.4 Variation av eldbandets intensitet	40
5.2.5 Beräkningstid	41
6. Analys och diskussion.....	42
7. Slutsatser	44
7.1 Slutsatser	44
7.2 Fortsatt arbete	45
8. Referenser	46

Bilaga 1	50
Bilaga 2	56
Bilaga 3	57
Bilaga 4	58

1. Inledning

Denna rapport från Räddningsverket är en förkortad version av den fullständiga rapporten. I den fullständiga rapporten redovisas bland annat de matematiska och fysikaliska delarna av modellerna mera i detalj. Den fullständiga rapporten finns tillgänglig på följande web-adress:

www.bth.se/fou/cuppsats.nsf

Jag har i denna rapport valt att använda mig av benämningen vegetationsbränder som ett samlingsnamn för både gräsbränder och skogsbränder. Det främsta syftet med denna rapport är att:

1. Redovisa vad som har gjorts inom området för vegetationsbrandmodellering under tidigare år och främst de senaste tjugo åren.
2. Att ge rekommendationer om det fortsatta arbetet med att utveckla en svensk vegetationsbrandmodell.

Den svenska forskningen om bränder i byggnad har varit mycket aktiv under en längre period, medan den svenska forskningen om vegetationsbränder under samma period har varit i det närmaste obefintlig. Alltså finns det för närvarande ingen vegetationsbrandmodell utvecklad för svenska förhållanden. Efterfrågan på en vegetationsbrandmodell har inte tidigare varit stort i Sverige, men de klimatförändringar som nu sker ökar risken för stora och intensiva vegetationsbränder i Sverige. Behovet av ytterligare och bättre verktyg för bedömning av vegetationsbränder kommer att vara mycket efterfrågade i framtiden. Redogörelsen ser också över erforderlig indata till en vegetationsbrandmodell och de indata som finns tillgängliga just nu. Denna fråga är mycket viktig eftersom kvaliteten på utdatan från en vegetationsbrandmodell är beroende på kvaliteten på indata. Studien ger vissa rekommendationer vad gäller indata. Under studien konstruerades en primitiv vegetationsbrandmodell och förfinades för att få en inblick i den komplexitet och de problem som finns vid utvecklingen av en fungerande operativ modell. Problemet med modellering av flygbränder finns inte med i denna studie, likaså är så kallade matematiska analoga modeller inte inkluderade i denna studie.

Den viktigaste källan för studien har främst varit följande vetenskapliga tidskrifter och andra vetenskapliga publikationer:

- Canadian Journal of Forest Research.
- Combustion and Flame.
- International Journal of Wildland Fire
- Combustion, Explosion and Shock Waves.
- USDA Forest Service, research papers.
- Ensis Bushfire Research.

Följande böcker har använts:

- *Combustion of forest fuels*, Byram GM (1959), New York, McGraw-Hill Book Co
- *Fire in forestry*, vol.1 & 2, Chandler G.C. (1991), New York, John Wiley & Sons

2. Bakgrund

2.1 Vegetationsbränder

Vegetationsbränder är ett av de äldsta naturfenomenen. Det finns gott om fossila bevis för vegetationsbränder. Vegetationsbränder är en global fråga som alla kontinenter är berörda av utom Antarktis.

Vegetationsbränder har sedan länge igångsatts av människan för att jaga, få bra skördar, för skydd mot rovdjur etc. De har varit och kommer alltid att vara en viktig del av naturen, som till exempel för vissa växtarter som är beroende av att vegetationsbränder inträffar. Idag anses okontrollerade vegetationsbränder av många som ett växande hot mot samhället. Även om Sverige har besparats från de värsta globala katastroferna, kan de klimatförändringar som nu sker öka risken för stora och intensiva vegetationsbränder även i Sverige. Behovet av ytterligare och bättre verktyg för bedömning av vegetationsbränder kommer att vara mycket efterfrågade i framtiden.

Vegetationsbränder drivs av extremt komplexa kemiska och fysikaliska processer. Interaktionen mellan processerna beror på kopplingen mellan väder (atmosfären), topografi, brand och bränsle (växtlighet). Förmågan att förutsäga vegetationsbrandens spridning blir inte enklare av det faktum att en av faktorerna - vädret - varierar i allra högsta grad med tiden.

Bland de många processer som äger rum vid en vegetationsbrand finner man bland annat förbränningsprocesser, värmeöverföringsprocesser, atmosfäriska processer och transport av syre.

De tre huvudfaktorerna - väder, topografi och bränsle - som påverkar brandförloppet vid en vegetationsbrand delas i allmänhet in i följande faktorer:

Väder:

- Lufttemperatur
- Vind
- Relativ luftfuktighet
- Nederbörd
- Luftmassornas stabilitet

Topografi:

- Lutningsgrad på sluttning
- Riktning på sluttning
- Raviner

Bränsle:

- Fukthalt
- Storlek och karaktär på bränsle (kompakt eller finfördelat bränsle)
- Energi innehåll
- Mängd bränsle
- Kontinuitet på bränsle
- Typ av bränsle

Förutom ovan nämnda faktorer, kommer också storleken på branden att vara en påverkande faktor då exempelvis större vegetationsbränder kommer att skapa starka vindar.

När det gäller verktyg som stöder beslutsfattandet vid en vegetationsbrand, är en av de stora utmaningarna att matematiskt modellera de komplexa processer som pågår.

2.2 Beslutstöd före, under och efter en vegetationsbrand

Flera olika former av beslutstöd finns tillgängliga. De kan delas in i följande tre huvudkategorier:

- Brandbeteende
- Brandriskprognos
- Skogsskötsel (till exempel när man bedömer brandens påverkan på ekosystemet)

Kartor är mycket viktiga verktyg. GIS-programvara är därför nästan oundgängligt vid utvecklingen av ett beslutstöd för vegetationsbränder. GIS-programvara används i alla tre kategorier av beslutstöd.

Innan en vegetationsbrand inträffar kan ett brandriskprognossystem användas för att öka beredskapen i ett visst område och förutsäga risken för en vegetationsbrand uppstår. Ett system som ger prognoser om brandbeteendet skulle kunna användas för insatsplanering - exempelvis identifiera områden där bränder med hög intensitet kan uppstå. Denna form av system skulle också kunna användas för att avgöra var resurserna ska skickas, om ytterligare resurser bör kallas in, placeringen av brandfronten vid en viss tidpunkt, vegetationsbrandens intensitet vid en viss tidpunkt etc.

Efter en vegetationsbrand skulle ett system för skogsskötsel kunna användas för att besluta om återplantering.

Denna rapport kommer enbart att behandla system som ger prognoser om brandbeteendet, eftersom ett brandriskprognossystem redan har varit i drift i Sverige under lång tid.

System som ger prognoser om brandbeteendet har utvecklats i syfte att öka vår förståelse för de fenomen som styr brandspridningen. Prognoser av effektutvecklingen syftar till att utveckla verktyg för att stödja räddningsledaren under släckningsarbetet liksom annan brandpersonal under insatsplaneringen.

De önskade egenskaperna för ett system som ger prognoser om brandbeteendet kan exempelvis vara:

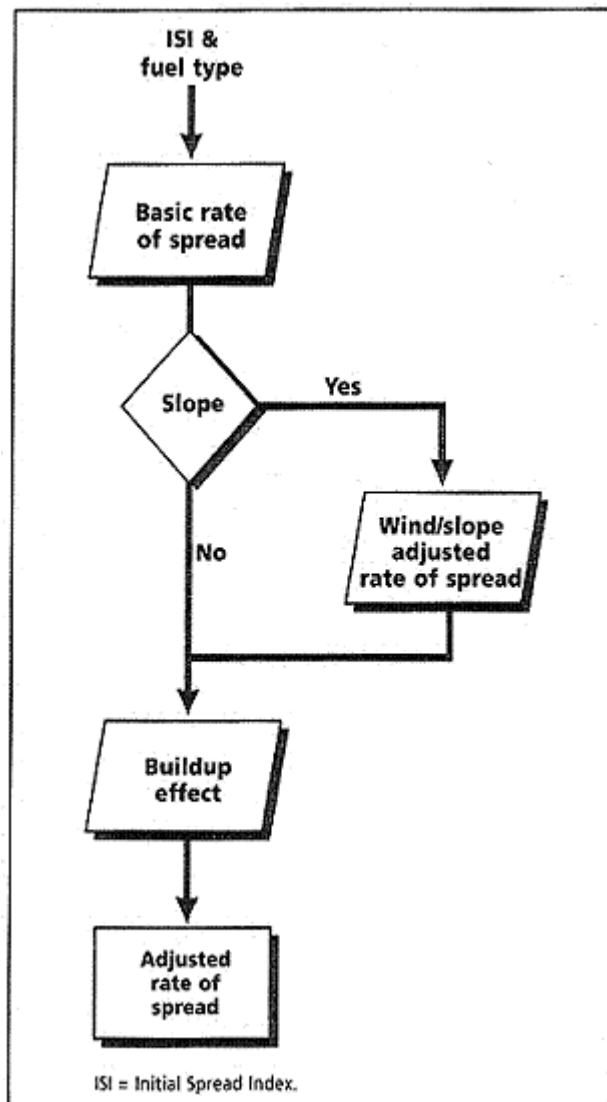
- Kort beräkningstid (hög operativ användbarhet).
- Enkel att använda med hänsyn till nödvändiga indata etc.
- Noggrannhet på prognoser.
- Ge uppskattningar på prognosernas tillförlitlighet.

2.3 Det svenska brandriskprognossystemet

Syftet med ett brandriskprognossystem är att ge räddningstjänsten möjlighet att upprätthålla en rimlig grad av beredskap, tillhandahålla beslutsstöd vid bedömning av eventuellt eldningsförbud samt vid information och varning till allmänheten.

Sverige använder ett kanadensiskt brandriskprognossystem kallat FWI (Fire Weather Index), som är kalibrerad för svenska förhållanden. Beräkningarna i systemet utförs av SMHI och består av ett gridsystem där varje nät är 22x22 km stort. Systemet använder sig av relativ luftfuktighet, nederbörd, vindhastighet och temperatur som indata. Utdatan från FWI-systemet består av ett huvudindex som kan sägas beskriva hur stora och intensiva vegetationsbränder vi kan förvänta oss under dagen.

Men FWI-systemet består också av flera underindex som kan användas för beräkning av till exempel en vegetationsbrands spridningshastighet. Det kanadensiska FBP-systemet är det system som används vid beräkningen av spridningshastigheten. Vid beräkning av spridningshastigheten används det så kallade ISI-index - ISI står för Initial Spread Index och beskriver hur snabbt en vegetationsbrand sprids när bara det översta lagret av finare bränslen är involverat - tillsammans med indata kopplat till den typ av bränsle som är involverat (det finns sammanlagt 17 typer av bränslekonfigurationer fördefinierade i systemet), justeringar med avseende på vind och lutning samt justeringar med avseende på större ansamlingar av brännbart material för att erhålla vegetationsbrandens spridningshastighet [1].



Figur 1. FBP-systemet. [1]

FBP-systemet används inte i någon större skala i Sverige, till stor del därför att den inte har kalibrerats för svenska förhållanden. För att vara mer exakt: den har inte kalibrerats med avseende på potentiella svenska bränslekonfigurationer.

3. Metod

3.1 Litteratur- och artikelinventering

För att ta reda på vad som gjorts och vad som görs inom området för vegetationsbrandsmodellering runt om i världen, genomfördes en litteratur- och artikelinventering. En stor mängd artiklar i vetenskapliga publikationer, en del litteratur och en stor mängd material på internet hittades.

Det mesta av materialet var från USA, Canada, Australien, Ryssland och Frankrike. Inget material påträffades från Sverige (med undantag för material som behandlar brandriskprognossystem).

Under inventeringen listades styrkor och svagheter hos de flesta av modellerna samt undersöktes vidare. Följande sökverktyg användes under inventeringen:

- LIBRIS
- ELIN @ Blekinge
- SAMSÖK beta
- Ebrary
- Google Scholar
- Google

Följande nyckel-ord användes under inventeringen:

- Skogsbrand
- Gräsbrand
- Modellering
- Wildfire
- Forest fire
- Modeling
- Modelling
- Mathematical model
- Mathematical modelling
- Mathematical modeling

Sökandet var främst ämnat för att undersöka modeller som beskriver vegetationsbrandens spridning och intensitet. Uppräkningen av modellerna i denna rapport är inte ett försök att beskriva alla tillgängliga modeller. De modeller som listas är ett urval av vanliga och ofta använda modeller.

Så kallade matematiska analoga modeller och simuleringsmodeller ingår inte i denna studie. En matematisk analog modell är en modell som bygger på en matematisk simulering av brandspridning som inte lika direkt är baserad på fysikaliska lagar.[2]

3.2 Fysikalisk modell

För att testa den matematik som är inblandade i några av vegetationsbrandmodellerna som finns i litteratur och artiklar konstruerades och testades en fysikalisk modell med hjälp av en partiell differentialekvation. Modellen var inte helt fysikalisk då vissa delar av den var av semi-empirisk karaktär. Syftet var också att få en känsla för komplexiteten i modellering av vegetationsbränder och den datorkraft som krävs. Till detta användes programmet MATLAB.

3.3 MATLAB

MATLAB är ett interaktivt paket med program för tekniska beräkningar och visualisering av data, utvecklat av The MathWorks Inc. MATLAB består av ett stort antal fördefinierade matematiska funktioner (som kan användas för programmering) som ger möjligheten att definiera egna funktioner. MATLAB har också en-, två- och tredimensionell grafik som kan användas för att visualisera resultaten.

MATLAB kompletteras av en samling av så kallade verktygslådor. De omfattar områden som optimering, bildbehandling mm

4. Modellering av vegetationsbränder

4.1 Modellering av vegetationsbränder i allmänhet

Det pågående arbetet med att förstå och modellera vegetationsbränders beteende startade för cirka 60 år sedan med "Analysis of fire spread in light forest fuels" av W.L. Fons [3]. Sedan dess har ett antal modeller utvecklats. Under årtionden direkt efter andra världskriget avsattes en massa resurser för forskning vad gäller vegetationsbränders beteende eftersom det fanns starka kopplingar mellan denna disciplin och med stora konflagrationer i samband med massbombningar och nukleära attacker [4].

Spridning av en vegetationsbrand kan betraktas som en pågående förändring av statusen i bränsleceller som är placerade i rummet. Processen i fråga är förbränning och är begränsad till vegetationspartiklar som antingen är levande eller döda. Övergången från den ena till nästa tillstånd är en process som innefattar successivt produktion, överföring och absorption av värme. Detta beror på miljön och bränslet för varje punkt i terrängen.

Tre viktiga faktorer som styr beteendet av vegetationsbränder är bränsle, flammor och värmeöverföringsprocessen, som diskuteras härnäst.

Bränslet

Bränslebädden består av brännbart och organiskt material. Bränslebädden kan vara homogen av en enda typ av bränsle och kan bestå av diskreta element som buskar med luckor i mellan. En botanisk klassificering av fördefinierade bränslekonfigurationer (s.k. bränslemodeller) används i vissa modeller som kan bistå vid modellering av den mängd bränsle som finns tillgänglig för förbränning liksom dess kompakthet. Att analytiskt karakterisera en torr, homogen bränslebädd bestående av endast en typ av bränsle, kräver fyra mätningar:

- Yta per volym av enskilda bränslepartiklar (detta kommer att relatera till hur mycket värme som kan absorberas per volym per tidsenhet vid en brand). [5]
- De enskilda bränslepartiklarnas densitet.
- Kvoten av de enskilda bränslepartiklarnas densitet och hela bränslebäddens densitet.
- Bränslebäddens djup.

En femte mätning behöver göras av fukthalten för bränsle som inte är torrt. Fukthalten beror på den specifika vikten, och därmed kommer effekten av fukthalten att vara större för ett bränsle med hög densitet [5].

Ytterligare mätningar behövs om bränslebädden består av mer än en typ av bränsle vilket naturligtvis alltid är fallet vid en vegetationsbrand.

De termiska egenskaperna hos bränslet kommer att vara avgörande då en värmekälla tillkommer. Den minsta uppsättning termofysiska variabler skulle vara ledningsförmåga och värmekapacitet för bränsle och eventuellt vatten (värmekapaciteten för bränslen i terrängen beror på temperaturen och fukthalten i bränslet). Med dessa variabler kan man beräkna entalpin för bränslebädden som en funktion av temperatur.

Om kemiska processer skall modelleras, krävs åtminstone att reaktionsvärmen, konstanten för reaktionshastigheten och aktiveringsenergin (förutsatt att Arrhenius lag är en rimlig uppskattning av reaktionshastigheten) är fastställda. En annan faktor som kan vara viktig är turbulenta transportprocesser i bränslebädden. I detta fall kan det vara nödvändigt att fastställa ytterligare variabler som beskriver denna typ av värme- och masstransport [6].

Den komplicerade karaktären av det bränsle som är inblandade i vegetationsbränder är en av de största utmaningarna med avseende på modellering av vegetationsbränder.

Flammor

När entalpin i någon del av bränslet närmar sig de kritiska värdena, vilket inträffar vid temperaturer på ca 320 °C för bränder i cellulosabränslen, börjar pyrolysen att märkas av. Nivåerna av förgasning och produktionen av kemiska ämnen under pyrolysen har identifierats för vissa bränslen, men det har visat sig svårt att komma med en allmän modell som gäller för olika bränslen.

På grund av denna svårighet antas i allmänhet en "antändningstemperatur". Man kan därefter beräkna den energi som krävs för att höja entalpin på bränslet från det ursprungliga tillståndet till antändning. Vidare antas även att vid antändningstemperaturen börjar flammor uppstå och att ytterligare energi som avges vid flammförbränningen beaktas i en energibalans för flammen, inklusive de mängder energi som överförs genom konvektion och strålning. Ett vanligt antagande är sålunda en flamma av en given storlek och temperatur samt med ett visst s.k. strålningstal. Om en brand inträffar när det är vindstilla så antas det ofta att den konvektiva energitransporten bara sker vertikalt (vilket inte alltid är fallet) [6].

Värmeöverföring

Det finns tre grundläggande former av värmeöverföring - ledning, konvektion och strålning. I allmänhet är konvektion och strålning de två främsta drivkrafterna under en vegetationsbrand. Vilket av dem som kommer att dominera kommer att variera från brand till brand.

Klassificeringen av vegetationsbrandmodeller i statistiska, semi-empiriska och fysikaliska, som beskrivs nedan, kommer att användas under hela denna studie.

De statistiska och semi-empiriska modellerna kan inte fullt ut förutsäga beteendet hos en brand på grund av förändringar som orsakas av interaktionen mellan brand-atmosfär. Detta eftersom brandens form, storlek och spridningshastighet antas vara konstant för ett visst bränsle, vind och lutning. Prognosen om den lokala vinden och samspelet mellan brand och vind är av stor betydelse när man förutsäger brandens beteende, särskilt i fall av häftiga brandförlopp. Bränder, där interaktionen mellan brand och atmosfär är stark, är trovärdigheten låg för användningen av statistiska och semi-empiriska brandspridningsmodeller [7].

4.2 Statistiska modeller

De statistiska modellerna gör inget försök att involvera fysikaliska processer, eftersom de endast är en statistisk beskrivning av testbränder. Modellen kan kalibreras för att beskriva testbränder, men eftersom den inte omfattar någon fysik så begränsas dess användningsområde. Kvaliteten på utdata från en statistisk modell kan vara mycket bra då det gäller att förutsäga spridningen av bränder som liknar testbränderna men den statistiska modellen är inte beräkningsintensiv. Avsaknaden av en fysikalisk grund betyder att statistiska modeller måste användas försiktigt utanför förhållanden som de verifierats för. Då variationen av testbränder är liten i jämförelse med de olika villkor under vilka naturliga bränder uppstår, är användande av statistiska modeller för vegetationsbränder av tvivelaktigt värde.

Ytterligare en nackdel med statistiska modeller är det faktum att icke-linjära samband mellan variablerna förloras i den nödvändiga linjäriseringsprocessen [5].

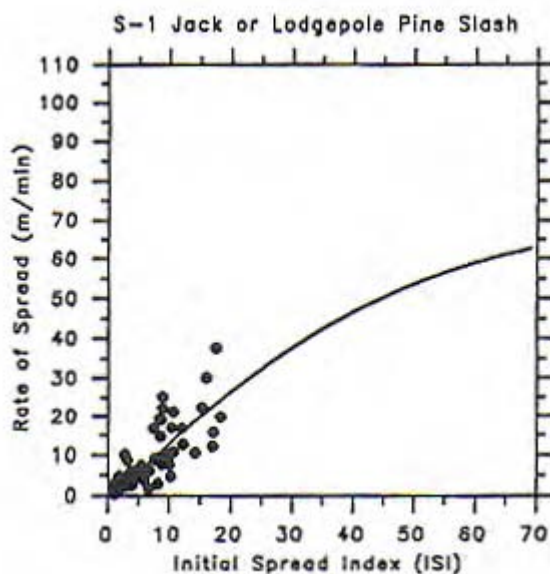
Nedan beskrivs två statistiska modeller: FBP systemet och McArthurs modell.

4.2.1 FBP-systemet

Sammanlagt 495 bränder ingår i det kanadensiska FBP-systemets databas, varav 409 är testbränder och 86 är dokumenterade vegetationsbränder. Testbränder är i allmänhet små (0.3-3.0 hektar i storlek) och har vanligen genomförts vid låg till måttlig brandfara. Dataanalysen sker med hjälp av enkla matematiska modeller och korrelationstekniker [1].

För att avgöra spridningshastigheten, använder FBP-systemet följande procedur (se figur 1 för det övergripande förfarandet) [1]:

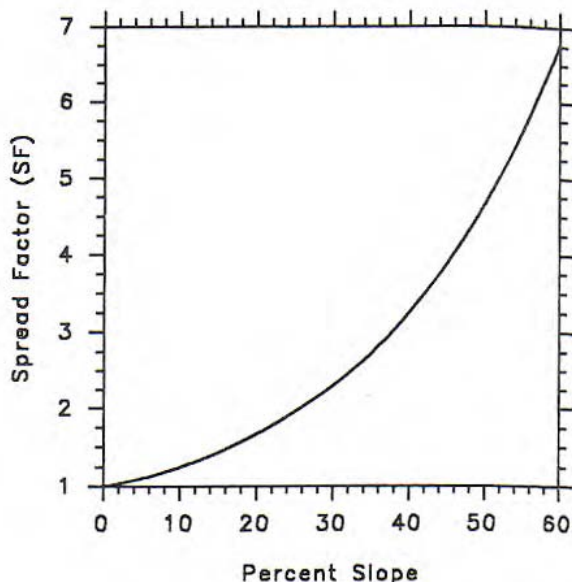
1. En initial spridningshastighet erhålls genom tabeller eller diagram, där lämplig typ av bränsle och existerande ISI-värde (ISI-värdet beskriver hur snabbt en vegetationsbrand sprids när det bara är det översta lagret av finare bränslen som deltar). Se figur 2 för ett exempel på ett diagram.



Figur 2. Initial spridningshastighet--ISI diagram för bränsletyp: avverkningsavfall med Jack eller Lodgepole pine [1].

2. Om topografin skall beaktas:

-- En spridningsfaktor fås från ett diagram. Se figur 3 för diagrammet ifråga.



Figur 3. Diagram över spridningsfaktor/lutningsgrad [1].

-- Räkna ut ISZ-värdet (ISZ-värdet är ISI-värdet när vindhastigheten är noll) med hjälp av Fine Fuel Moisture Code (FFMC) som indata.

-- Spridningshastigheten vid vindhastighet lika med noll och för gällande bränslemodell erhålls genom ett diagram.

-- Spridningshastigheten som beaktar topografin men sätter vindhastigheten lika med noll beräknas genom att multiplicera spridningshastigheten vid vindhastighet lika med noll med spridningsfaktorn.

-- Räkna ut ISF-värdet (ISI värde som beaktar topografin men sätter vindhastigheten lika med noll).

-- Beräkning av WSE (den ekvivalenta vindhastigheten för sluttningen).

-- Beräkning av den totala vinden, WSV, med hjälp av ett parallelogram.

-- Beräkningen av det slutliga ISI värdet, där både vind och topografi beaktas.

-- Den slutliga spridningshastigheten - RSI – fås med hjälp av ett diagram för motsvarande bränslemodell och det slutliga ISI värdet.

3. Justeringar med avseende på större ansamlingar av brännbart material (för att beakta den mängd bränsle som finns tillgängligt för förbränning inom hela bränslekomplexet) görs genom beräkning av Buildup effect (BE).

4. Beräkningen av den slutliga spridningshastigheten.

För att bestämma den förväntade intensiteten vid brandfronten, använder FBP systemet ett uttryck där den förväntade totala bränsleförbrukningen och den förväntade spridningshastigheten på brandfronten används som indata.

Övergången från en brand på markytan till en toppbrand bygger på teorin av Van Wagner [8] och bestäms på följande sätt i FBP systemet: Teorin börjar med att jämföra brandintensiteten för den faktiska markbranden med ett kritisk värde för markbränders intensitet. Den kritiska brandintensitetens värde beräknas med hjälp av höjden upp till trädets krona och vegetationens fukthalt. Om brandintensiteten vid en markbrand är större än det kritiska värdet, kommer en toppbrand att uppstå.

Förutom den beräknade spridningshastigheten på brandfronten och den eventuella övergången till en toppbrand samt brandfrontens intensitet, ger FBP systemet även följande utdata:

- Förbränning av bränsle
- Acceleration
- Spridningsavstånd för brandfronten
- Spridningsavstånd och spridningshastighet för det bakre brandavsnittet
- Längd/bredd-förhållande för brandområdet
- Spridningsavstånd och spridningshastighet för branden längs flankerna
- Elliptiskt brandområde
- Elliptisk brandperimeter
- Spridningshastighet på eldbandet
- Brandintensiteten för det bakre brandavsnittet och längs flankerna

Eftersom det är en statistisk modell, har den dålig prestanda utanför det område som den verifierats för.

En stor fördel vid användning av FBP system skulle vara den nära kopplingen till FWI-systemet som används i Sverige. Flera underindex från FWI-systemet kan användas för beräkningar i FBP-systemet. Därför kommer användning av FBP-systemet att kräva mindre tid och resurser när det gäller att samla in nödvändiga indata.

4.2.2 McArthurs modell

McArthur modellerna bygger på ett stort antal observationer - över 800 bränder undersöktes. Modellerna konstruerades utan förutfattade föreställningar om det funktionella sambandet mellan variabler. Modeller används mycket i sydöstra Australien, som innehåller gräs- och skogstyper som modellerna har kalibrerats för. Nyligen ersatte CSIRO Grassland Fire Spread Meter (GSFM) McArthurs modell för gräsbränder i Australien.

Vid en jämförelse med resultatet från verkliga bränder visar det sig att Mark 4-modellen (som är en gräsbrandmodell) har en tendens att undervärdera spridningshastigheten [9].

4.3 Semi-empiriska modeller

Som nämnts innan baseras ofta de semi-empiriska modellerna på principen om energins bevarande, men de gör inte någon skillnad mellan värmeöverföring via ledning, konvektion och strålning. Även de semi-empiriska modellerna saknar exempelvis interaktionen mellan flamma och bränsle, vilket är en viktig del vid modellering av vegetationsbränder. Således är utdatan från dessa modeller av begränsad noggrannhet.

De semi-empiriska modellerna kan beakta horisontell variation av bränslebädden, men kan inte beakta den tredimensionella strukturen av bränslen. Övergången från markbrand till toppbrand är således ett exempel på ett brandfenomen som inte kan analyseras med denna typ av modell. Istället använder de semi-empiriska modellerna en annan metod för att bedöma risken för övergång till toppbrand, som kan ses i Rothermels toppbrandsmodell nedan.

Under utvecklingen av en semi-empirisk modell utförs ett antal olika laboratorieexperiment och observationer i fält utförs för att få den nödvändiga informationen [10].

Jämfört med en fysikalisk modell är den semi-empiriska modellen inte beräkningsintensiv och innehåller variabler som i allmänhet är lätt att mäta i fält och syftar till att ge brandbefälet prognoser i realtid vad gäller spridningshastighet och brandintensitet för vegetationsbränder. Så trots de problem som finns med begränsad precision, så gör snabbheten och enkelheten hos dessa modeller dem användbara [11].

Nedan beskrivs ett antal semi-empiriska modeller.

4.3.1 Rothermels modell (1972)

Detta är den viktigaste semi-empiriska modell som hittills har utvecklats. Rothermel utförde sina experiment under mycket skiftande miljö- och bränsleförhållanden och inkluderade effekterna av vind och lutning i hans modell. De mångskiftande testerna gör modellen tillämpbar vid många olika vegetationsbränder.

Rothermel-modellen beaktar bara markbränder och inte toppbränder. Inte heller beaktas flygbränder i modellen.

När det gäller bränsleparametrar kan både specifika bränsleparametrar för området i fråga och fördefinierade parametrar för den aktuella bränslemodellen användas.

Modellen var avsedd att simulera en brand som har stabiliserats till ett kvasi-konstant tillstånd vad gäller spridning. De flesta vegetationsbränder börjar från

en enda plats och sprider sig ut i terrängen, växer i storlek och tar form som en ellips med den stora axeln i den riktning som är mest gynnsam för spridning (oftast i vindriktningen). När branden är stor nog så att spridningen av någon del av branden är oberoende av influenser som finns på motsatt sida av branden, kan det antas att branden har stabiliserats till en brand längs en linje. En brand längs en linje uppträder som en reaktionsväg som sprids med konstant spridningshastighet över ett område med homogent bränsle [12]. Rothermel-modellen bygger på en rapport av Frandsen [13]. Rothermel-modellen definierar brandens reaktionsintensitet som värmeavgivningen per ytenhet vid brandfronten. Rothermel antar att brandspridningen är proportionell mot reaktionsintensiteten.

Ett viktigt koncept i Rothermels modell är att både reaktionsintensiteten och energitransporten vid brandfronten kan utvärderas separat och korreleras för plan yta och för förhållanden där det är vindstilla.

Observera att modellens brandspridningsalgoritm utgår ifrån enhetlig bränsletyp, enhetliga bränsle förhållanden, enhetlig lutning och enhetlig vind.

Rothermel-modellen har använts vid flera provbränder runt om i världen och visat rimlig noggrannhet i utdatan. Men modellen har visat betydande problem när den används i mer strukturellt komplexa system [14].

Rothermels toppbrandsmodell (1991)

Rothermel delar in toppbränder i två olika grupper:

- Vinddrivna bränder
- Plymdominerade bränder

Rothermel använder sig av rökpelarens egenskaper för att urskilja de två olika grupperna. Vid en vinddriven brand ökar vindhastigheten med höjden och böjer rökpelaren kraftigt i vindriktningen.

Vid en plymdominerad brand, böjs inte rökpelaren av vinden och kan fortsätta att växa när brandintensiteten ökar.

Rothermel antar att huvudsakligen vindhastigheten och det döda, fina bränslets fukthalt påverkar toppbrandens spridning.

Modellen innehåller ingen karakterisering av bränslet.

Rothermel använder ekvationer som utarbetats av Byram [15] i hans modell, för att beräkna effekten av branden och effekten av vinden.

Om effekten av branden är större än för vinden, kan branden förväntas vara plymdominerad. Om kraften i vinden är större än för branden, kan branden förväntas vara vinddriven [16].

Rothermel använder också förhållandet mellan observerade spridningshastigheter från åtta toppbränder i västra USA och förväntad spridning, för att komma fram till ett genomsnittligt värde på 3,34. Detta värde

multiplieras med den förväntade markbrandens spridningshastighet för att få spridningshastigheten för motsvarande toppbrand [17].

Rothermels toppbrandsmodell har en tendens att undervärdera spridningshastigheten. En orsak till detta kan vara att Rothermel använder en metodik för markbränder på toppbränder [18].

4.3.2 BEHAVE och FARSITE

Mjukvaran BEHAVE och FARSITE omfattar flera modeller och modelleringsystem för att simulera brandtillväxt över ett tvådimensionellt landskap.

Rothermels modell (1972) är grunden för BEHAVE.

Modellerna som återfinns i BEHAVE inkluderar bland annat:

- Markbränders spridning och intensitet
- Avstånd där flygbränder kan uppstå
- Sannolikhet för att antändning kan ske till följd av glödande material eller av blixtnedslag
- Övergången från markbrand till toppbrand
- Spridning av toppbrand

FARSITE är en programvara som bygger på semi-empiriska formler som de i BEHAVE paketet. Den innehåller till exempel Van Wagners toppbrandsmodell (1977) och Rothermels toppbrandsmodell (1991).

Exempel på modeller som används i FARSITE:

- Toppbrandsmodell
- Accelerationsmodell
- Modell för flygbränder
- Modell för fukt i bränslet

4.3.3 Van Wagners toppbrandsmodell och spridningsmodeller (1977)

Van Wagner utvecklade fysikaliska kriterier för initiering och spridning av toppbrand.

Van Wagner beskrev kronskiktet bara i form av täthet på vegetationen och fukthalt, och förutsätter att markens bränsleskikt är tydligt åtskild från kronskiktet via en kal trädstam.

Genom att anta att kronskiktets antändning bara beror på att en viss lägsta temperatur uppnås vid basen av kronskiktet, använder sig Van Wagner av ett uttryck för beräkning av temperaturen. Om den lägsta temperaturen, eller snarare det lägsta värmeflödet, överskrids antas toppbrand uppstå.

Med hjälp av Van Wagners modell är det också möjligt att beräkna spridningen av toppbranden.

Van Wagner delar in toppbränder i tre olika grupper - baserade på markbrandens intensitet, horisontella värmeflödet och spridningshastigheten:

- Passiv toppbrand. Vid en passiv toppbrand uppnås ett minimivärde på markbrandens intensitet, men den minsta spridningshastigheten uppnås inte.
- Aktiv toppbrand. Vid en aktiv toppbrand uppnås ett minimivärde på markbrandens intensitet och likaså vad gäller spridningshastigheten.
- Oberoende toppbrand. En oberoende toppbrand kan uppstå om värmeflödet i kronskiktet överskrider ett minimivärde [8].

Van Wagners modell förlitar sig enbart på det konvektiva värmeflödet för att bestämma då kronskiktet antänds. Modellen innefattar inte värmestrålningens inverkan. Även utdatan från modellen är tveksamt med hänsyn till vindens inverkan.

Vid valideringen av resultaten från Van Wagners modeller visade de sig vara godtagbara [18].

4.4 Fysikaliska modeller

De flesta av de fysikaliska modellerna är baserade på samma koncept som i Rothermels modell, dvs ett stationärt tillstånd med avseende på energiflödet.

En stor fördel med de fysikaliska modellerna är att de är baserade på kända förhållanden och därmed underlättas deras användning för ett stort antal vegetationsbränder [14].

Men arbetet med fysikaliska modeller försvåras för närvarande av bristen på förståelse av flera processer, såsom karakterisering av de kemiska processer som äger rum vid förbränning, flammors egenskaper, kvantifiering av fysikaliska processer som reglerar värmeöverföringen och varje värmeöverföringsmekanism bidrag till den totala energi som överförs till det oförbrända bränslet [19].

Som ett resultat av detta, finns det även i fysikaliska modeller semi-empiriska delar då rent fysikaliska modeller är omöjligt för tillfället på grund av problemets enorma komplexitet. En annan nackdel med avseende på fysikaliska modeller är att dagens indata inte är tillräckligt exakt för att motivera användning av fysikaliska modeller. Även några av de grundläggande variabler som ingår i en fysikalisk modell är mycket svåra att mäta i fält, så antingen antas de eller så mäts de i ett laboratorium.

En viktig del i utvecklingen av en fysikalisk modell är validering gentemot testbränder eller testbränder. Utan denna validering är användningen av modellen av tvivelaktigt värde.

Nedan beskrivs ett antal fysikaliska modeller.

4.4.1 Albini (1986)

Albini utvecklade en precis formulering av brandspridningen för en brand längs en linje genom värmeöverföring (närmare bestämt via strålningsvärme). De fullständiga integralekvationerna som beskriver värmeöverföringen i ett enhetligt skikt - som antas vara slumpmässigt fördelat, termiskt tunt och bestå av radiometriskt svarta bränslepartiklar - används för att binda samman förbränningszonen och det oförbrända bränslet. Modellen fungerar med ett tvådimensionellt gränsskikt för antändning.

Modellen betraktar luft som transparent, men beaktar vattenångans absorption av värmestrålningen.

Modellen beaktar även kylning via naturlig konvektion och återstrålning.

Ekvationerna löses numeriskt med hjälp av en iterativ process [6] [20].

Som tidigare nämnts gäller modellen endast vid situationer där värmestrålning är den dominerande mekanismen för energiöverföring.

Modellen stämde ganska väl överens med resultaten från mindre testbränder i ett laboratorium [20].

I senare versioner av modellen har förbättringar skett, till exempel utökningen av olika bränslenivåer, där markbränsle, bränsleskiktet under kronan och kronskiktet ingår i spridningsmodellen [21].

4.4.2 Kopplad atmosfär-brand-modell

Modellen är utformad för att ingå i en dynamisk kopplad brand-atmosfär kod, som understryker samspelet mellan brandplymen och atmosfären.

Den fluiddynamiska modellen löser ekvationer för hastighet, massa, energi, vattenånga samt moln- och nederbördsvariabler.

Modellen är tredimensionell och använder sig av kaplade definitionsmängder i rummet. Dessa definitionsmängder är konstruerade så att medan yttre definitionsmängder löser rörelse av atmosfäriska skalor såsom fronter, löser det inre området rörelser av en finare skala såsom brandvirvlar inne i eldbandet. Den allra innersta definitionsmängden är den som direkt interagerar med brandmodellen. Modellerna är fullständigt sammankopplade så att atmosfärisk information används i spridningen av eldbandet och värme och fukt från brandmodellen återfinns i atmosfären och ger förändrade rörelser i atmosfären.

Spridningshastigheten i modellen bestäms med hjälp av formler av Rothermel (1972) och McArthur.

Modellens massförlust bestäms med hjälp av parametrisering av massförlusten

vilket beskrivs av Albini [22]. Vegetationsbrandens spridning genom en bränslecell innebär att punkterna i cellen kommer att ha brunnit under olika tidslängder. För att bestämma den fraktionerade massförlusten under ett tidssteg, bestäms och integreras den tidigare avbrända bränsleytan i cellen för att därefter beräkna den återstående mängden massa.

Eftersom den fraktionerade massförlusten är en asymptotiskt avtagande funktion med ökande tid, är dess tidsderivata någorlunda slät för att exakt passa vid användning av kombinationer av lägre ordningar av polynom, exponential eller Pade approximationer.

En kod för toppbrandsexperiment är också inbyggd i modellen. Innan trolig antändning av kronan sker, absorberas värmeväxlingen från markbranden helt av kronan. När kronan är torr, antänds den vid ett tröskelvärde på $0,17 \text{ MW/m}^2$. En toppbrand i modellen är kopplad till markbranden och kan inte spridas på egen hand. Den torra kronans massa som är lika med ändringen i fraktionerad yta av markbranden förbränns och omvandlas till värme. Värmen från marken och kronan för varje bränslecell summeras tillbaka till den större definitionsmängden och används som underlag för flöden i den atmosfäriska modellen.

Då modellen använder mestadels semi-empiriska formler, kan datorresurserna huvudsakligen användas för att lösa atmosfärfysiken.

Modellen betraktas för närvarande som en forskningsmodell [23].

4.4.3 Multifasmodeller

Modeller som huvudsakligen innefattar interaktionen mellan flamman och bränslet kallas multifasmodeller. Vid användning av multifasmodeller, betraktas vegetationen som bränslepartiklar fördelade i luften. Partiklar med liknande egenskaper grupperas i familjer eller fasta faser (familjer kan till exempel vara löv, kvistar). För att beskriva växtligheten definieras volymfraktionen för varje familj. Volymfraktionen för en familj är andelen av rumsvolymen som upptas av partiklar i fast fas vid en viss punkt i vegetationsskiktet.

Observera att denna typ av modell inte inkluderar den kompletta interaktionen mellan plym och atmosfär.

Grishin et al. (1983)

Grishin et al. [24] föreslog en brandspridningsmodell som beaktar interaktionen mellan flamman och bränslet - uppvärmning, torkning, pyrolys och förbränning. Modellen utnyttjar massans, momentets och energins oförstörbarhet i både fast fas och gasfas. Under utvecklingen av modellen

antogs att de turbulenta transportprocesserna i vegetationen kan modelleras med hjälp av turbulent utbyte.

Skogen anses vara ett multifas-medium med ett flertal skikt av vegetation och ett heterogent medium i rummet utanför brandzonen. Inne i brandzonen anses skogen vara en poröst spridd, sju-faser, två-temperaturer, en-hastighet, reaktivt medium. De sex faserna inom förbränningszonen är torrt organiskt material, vatten i flytande form, fasta produkter från pyrolys, aska, gas och partiklar i den dispergerade fasen.

Ingen information om resultatet av modellen (med hänsyn till testbränder) har påträffats.

Grishin et al. (2002)

Under 2002 presenterade A.M. Grishin och O.V. Shipulina en modell för spridning av toppbränder i homogen vegetation [25].

I modellen betraktas kronan som ett reaktivt, multifas, kontinuerligt, poröst medium, bestående av ett torrt organiskt material, vatten i flytande fas, kolberikade kondenserade pyrolysprodukter, mineralkomponenter och gas- och dispergerade faser. För enkelhetens antas gasfasen bestå av O₂, en brännbar gas (främst CO) och CO₂ och andra inerta gaser.

I modellen antas flammen ovanför kronan stråla som en platt vägg belägen i en viss vinkel till kronan, vars värde är beroende av vindhastigheten ovanför kronan.

Ingen information om resultatet av modellen (med hänsyn till testbränder) har påträffats.

Balbi et al. (1999)

Balbi J.H., Santoni P.A. och Dupuy JL presenterade under 1999 en modell med reaktionskemi, där de antar att ingen vind och ingen lutning förekommer över en homogen bränslebädd. De har också antagit att förbränningsreaktionen sker vid konstant temperatur, att reaktionsvärmen är konstant och att den energi som frigörs vid förbränning är proportionerlig mot den mängd bränsle som förbränns.

Modellen innehåller en kylande konvektiv term. Den innehåller också en ekvivalent diffusionsterm för att representera alla tre mekanismer för värmeöverföring.

Följande antaganden gjordes med avseende på kemiska förbränningsreaktioner:

- Förbränningen sker vid en viss temperatur.
- Reaktionens entalpi har ett konstant värde.

- Bränslets massa minskar exponentiellt.
- Den värme som frigörs vid förbränning är proportionerlig mot den förbrända mängden bränsle.

Testbränder genomfördes och visade bra överensstämmelse med den föreslagna modellen under brandens tillväxtskede. Inga mätningar gjordes under det fortsatta brandförloppet för testbränderna [26].

Modellen är kraftigt förenklad och är främst inriktad som en initial modell, som skall ytterligare utvecklas och göras mer sofistikerad.

PIF97

I PIF97 modellen beaktas två faser av ett medium: gas och fast. De två faserna utgör ett multifasmedium tillsammans. Modellen förutsätter även att den fasta fasen är homogen.

Modellen är uppdelad i två delar som svarar mot två zoner:

- Förvärmningszonen: inkluderar värmestrålningen och konvektiva värmen som överförs till bränslebädden framför den brinnande zonen. Modellen förutsätter exempelvis att bränslebädden består av en ursprungligen homogen fördelning av cylindriska partiklar vars dimensioner härrör från experimentella data. Bränslepartiklarna antas vara stilla. Värmestrålningskomponenten beaktar värmestrålningsflödet från angränsande bränslen, antändningsskiktet, flamman och den omgivande fluiden som omger bränslet. Gasfasen antas vara transparent med avseende på värmestrålning. En antändningstemperatur för det fasta bränslen är satt till 600 K.
- Flamförbränningszonen: den andra delen i modellen är flödet som återfinns i flamförbränningszonen bakom antändningsskiktet (antändningsskiktet definieras som den yta där bränslepartiklarna uppnår antändningstemperatur). Temperaturen i denna gas antas ha ett konstant värde på 900 K [27] [28].

När man skall finna en numerisk lösning på modellen, är problemet att lösa de kopplade energiekvationerna från förvärmningszonen och systemet av ekvationer från flamförbränningszonen. Uppgiften är att finna en spridningshastighet och en massflödestäthet vid antändningsskiktet, som uppfyller samtliga ekvationer.

Modellen har förfinats i senare versioner till att omfatta flera fasta faser samt ett kronskikt.

Den kan modellera beteendet hos en vegetationsbrand i en skala av landskapsstorlek - dvs hundratals meter.

När man jämför prognoser från modellen jämfört med testbränder, visade emellertid modellen dåliga resultat med avseende på vind- och lutningsförhållanden [4].

WFDS

WFDS är ett exempel på en modell som både beaktar interaktionen mellan flamma och bränsle och mellan plym och atmosfär. Huvudsyftet med WFDS var att få en modell som förutsäger brandspridning i både skog och mark samt bebyggelse.

WFDS är en vidareutveckling av den vanligt förekommande Fire Dynamics Simulator (FDS). I denna modell används både pyrolysen av bränslet och förbränningen i gasfas i en numerisk lösning av Navier-Stokes ekvationer (som har med effekterna av bärighet, konvektion och turbulens). Dataresurserna används främst för att lösa brandens förbränning och det atmosfäriska flödet över branden. Förbränningen modelleras med hjälp av den s.k. mixture fraction metoden, eftersom upplösningen på gridnätet är för stort (se nedan för minsta storlek) för att tillåta att förbränningen modelleras med reaktionskemi. Modellen kan inte återge det lokala vädret inom brandområdet. WFDS är helt och hållet tredimensionellt.

Grunden för markvegetationsmodellen i WFDS är antagandet att förbränningen sker huvudsakligen ovanför markens bränslebädd. Detta överensstämmer med flammhöjder ovanför bränslebädden som är mycket större än höjden på bränslebädden själv. Med detta antagande kan två gridsystem användas en för gasfasen som definierar brandplymen och en annan för bränslebädden som bland annat definierar värmeöverföring. En metod som liknar tillvägagångssättet med multifasmodeller användes för att simulera förändringar i den fasta fasen.

Jämfört med FIRETEC löser WFDS mer direkt de ekvationer som styr interaktionen mellan brand och bränsle samt brand och atmosfär.

WFDS utnyttjar ett varierande gridsystem för att bestämma volymenheter så små som $1,6 \text{ m} \times 1,6 \text{ m} \times 1,4 \text{ m}$ inom ett område i storleksordningen $1,5 \text{ km}^2$ i yta och 200 m högt. Utanför området som är av intresse, minskas upplösningen på gridsystemet för att förbättra beräkningseffektiviteten - samma metod vanligen används i FDS.

Den framtida användningen av modellen kommer att bero på förmågan att framställa finskaliga detaljer såsom förbränning av enstaka, enskilda träd [29].

Utdatan från modellen har jämförts med resultaten av testbränder. Modellens utdata visade sig ganska väl stämma överens med testbränder, men i ett av fallen övervärderade modellen spridningshastigheten längs flanken [7].

Modellen kan modellera beteendet hos en vegetationsbrand i en skala av landskapsstorlek - dvs hundratals meter.

FIRETEC

Liksom för WFDS, är FIRETEC en multifasmodell där både interaktionen mellan flamman och bränslet samt plymen och atmosfären beaktas. Modellen bygger på medelvärdesekvationer för bevarande av massan, momentet, energin och kemiska ämnen. Anledningen till att medelvärde används är att modellering i en skala av landskapsstorlek kommer att leda till mycket tidsödande och resurskrävande beräkningar om exempelvis småskaliga kemiska processer beaktas. Modellen använder en helt kompressibel gastransport-formulering för att koppla dess fysikbaserade vegetationsbrandsmodell med den lokala atmosfärens rörelser. Modellen kan köras i ett två- eller tredimensionellt läge.

Några exempel på de fysikaliska fenomen som studeras är effekterna av varierande vindförhållanden, icke-homogen terräng, icke-enhetlig bränslebädd med icke-kontinuerlig fördelning och olika vertikala bränslestrukturer.

FIRETEC kan också modellera flygbränder, där man använder en probabilistisk metod i kombination med vindhastigheter.

Då specifikationen av bränslet i modellen bygger på de fysikaliska egenskaperna hos vegetationen, kan modellen tillämpas på bränslen av olika typ och distribution. Således är inte modellen beroende av fördefinierade bränslemodeller.

Modellen kombineras med en hydrodynamisk modell - HIGRAD - för att simulera vegetationsbränder med hjälp av en tredimensionell finit volym grid som följer terrängen.

Den allmänna strategin i utvecklingen av modellen är att dela upp de olika variablerna som återfinns i ekvationerna för bevarande av massa, moment och energi i medelvärden och varierande delar och sedan ta genomsnitt.

Variablerna som återfinns i de slutgiltiga partiella differentialekvationerna är genomsnittliga fysikaliska storheter ämnade att beskriva de resulterande genomsnittliga egenskaperna hos gaser och fasta ämnen inom den minsta volymen där genomsnittliga data används.

Det stora antal kemiska reaktioner som förekommer vid en vegetationsbrand förenklades till ett litet antal reaktioner som innefattar pyrolys av trä och flera fast-gas-reaktioner (förbränning av kol i syre) och gas-gas-reaktioner (två reaktanter som ger en slutlig produkt och inga ämnen vid övergången).

I modellen antas det att hastigheten på de exoterma reaktionerna i områden med aktiv förbränning är begränsad av den hastighet som reaktanter kan ansamlas i de rätta proportionerna.

För det fasta bränslet samt tillhörande fukt, används ekvationer med medelvärden hos ämnet inom ett område mycket större än själva bränsleelementen.

Genom att dela in de lokala momentana variablerna i medelvärden och varierande delar och beräkna genomsnitt, kan man formulera ekvationer för bevarande av genomsnittliga densiteten för syre, den genomsnittliga densiteten av gasblandningen, det genomsnittliga momentet för gasblandningen per volymenhet i en viss riktning samt den genomsnittliga potentiella temperaturen i gasblandningen.

Energien som avges eller absorberas av gasfasen beräknas med hjälp av ett probabilistiskt tillvägagångssätt. Den avgivna energin som sprids genom gasfasen bygger på en täthet på värmestrålningsenergin som inte är beroende av temperaturen hos gasen. Den absorberas av fasta objekt beroende på deras yta i förhållande till deras volym [10] [30].

FIRETEC verifierades mot storskaliga experimentella gräsbränder och visade på goda resultat. I senare genomgångar av modellen, har värmestrålningsmodellen i FIRETEC funnits vara mycket approximativ [4].

Modellen kan modellera beteendet hos en vegetationsbrand i en skala av landskapsstorlek - dvs hundratals meter.

4.5 Tillgänglig indata

Även om den utvecklade modellen för vegetationsbränder kan vara mycket sofistikerad kommer den att vara kraftigt beroende av kvaliteten på indatan.

4.5.1 Väder

En optimal lösning skulle vara att använda tillgängliga meteorologiska data från det befintliga FWI-systemet. Med avseende på väderdata skulle följande indata kunna erhållas genom FWI:

- Vindens hastighet och riktning
- Temperatur
- Relativ luftfuktighet
- Nederbörd

Men frågan är - med avseende på indata från FWI - hur mycket hänsyn tas till lokala variationer i rummet när gridsystemet är ganska grovt (22x22 km i storlek) och till variationer i tiden, då utdatan från FWI-systemet bara tillhandahålls en gång om dagen.

Ett mycket lovande projekt pågår i västra Sverige. Projektet heter "Alarm" och ger möjlighet till bättre förutsägelser från gasspridningsmodeller, eftersom tillgängliga väderdata här uppdateras en gång i timmen från lokala väderstationer [31].

Med hjälp av väderdata från "Alarm"-projektet skulle vi naturligtvis kunna få en bättre modellering av vegetationsbränder.

4.5.2 Topografi

Då detta är den mest statistiska faktorn och i och med det digitala materialet som finns tillgängligt från Lantmäteriet, borde inte indatan med avseende på topografin orsaka några större problem.

4.5.3 Bränsle

Även om variationer i tiden av växtlighet i ett område inte varierar lika mycket som vädret, kan variationerna i rummet bli mycket omfattande och krävande.

Det finns flera metoder för att klassificera vegetationen i olika typer av bränsletyper redo att användas vid modellering av vegetationsbränder. Metoderna kan till exempel vara rekognoscering i fält, användande av satellitbilder, användande av flygbilder, användande av statistiska uppgifter etc.

Vid rekognoscering i fält går ett landskap igenom på plats och bränsleförhållanden registreras i bärbara datorer eller på papperskartor. Den främsta fördelen med rekognoscering i fält är att bränslet kartläggs vid dess faktiska förhållanden som observeras från marken, vilket gör att antalet fel blir lågt. Insatsen i form av arbetstid är emellertid stor som gör att det är mycket kostsamt och inte särskilt praktiskt. Men vid korrelation av de andra metoderna - som exempelvis satellitbilder – kan rekognoscering i fält vara ett mycket användbart verktyg [32].

Användning av satellitbilder och flygbilder kommer att kraftigt förenkla processen och spara både tid och resurser, men det finns flera nackdelar [33]. Med flygbilder och satellitbilder är det i vissa fall omöjligt att upptäcka markbränslen eftersom marken ofta är skymd av kronskiktet. Dessutom är det ofta svårt att skilja mellan olika typer av bränsle med hjälp av satellitbilder eller flygbilder.

Rekognoscering i fält är en viktig del även om satellitbilder eller flygbilder används. Rekognoscering i fält används i det här fallet för att kontrollera och

korrigera framtaget material baserat på satellitbilder och flygbilder.
Även GIS-modeller kan användas för att undersöka förhållandet mellan jordarter, skogsbruksaktiviteter etc [34] [35].

Således är ny teknik vad gäller satellitbilder, flygbilder och bildtolkning mycket efterfrågade för att få fram exakta bränslekartor.

Det stora problemet som måste lösas är att kunna skilja mellan toppbränslen och markbränslen. En lösning här kan vara att använda så kallade hyperspectral sensed products och active remote sensors. Synthetic Aperture Radar (SAR) och Lidar har visat lovande resultat vid uppskattningen av biomassa, beståndsvolym och kronhöjd [32].

5. En enkel fysikalisk modell

För att testa den matematik som finns i några av de olika modellerna för vegetationsbränder, och för att få lite känsla för komplexiteten i modellering av vegetationsbränder, utvecklades en fysikalisk modell med hjälp av en partiell differentialekvation.

Vid arbetet på den fysikaliska modellen har jag använt mig av modellen av Balbi et al. som grund. Anledningen till mitt val var det positiva resultatet vid en jämförelse mellan de simulerade värdena och motsvarande värden för testbränder och möjligheten till förbättringar.

5.1 Initial modell

Den inledande modellen var mycket förenklad för att först av allt få en fungerande modell som gav rimliga resultatvärden.

Den ursprungliga modellen var förenklad i följande avseenden:

- 2-dimensionell i en rumsvariabel och en tidsvariabel: (x, t) .
- Vindstill
- Plan yta
- Ingen reaktionskemi
- Användning av konstanta värden när så är möjligt

Följande förbättringar gjordes senare:

- En term lades till som uttrycker överföring av strålningsvärme från flamman till bränslet framför flamman.
- En term lades till som uttrycker värmestrålningsförlusten från bränslet framför flamman.

Bränsleparametrarna som användes vid simuleringarna gällde *Pinus Pinaster*, som dock är en tallart som finns i Medelhavsområdet och inte i Norden. Men värdena för *Pinus Pinaster* användes då de fanns tillgängliga genom litteraturen.

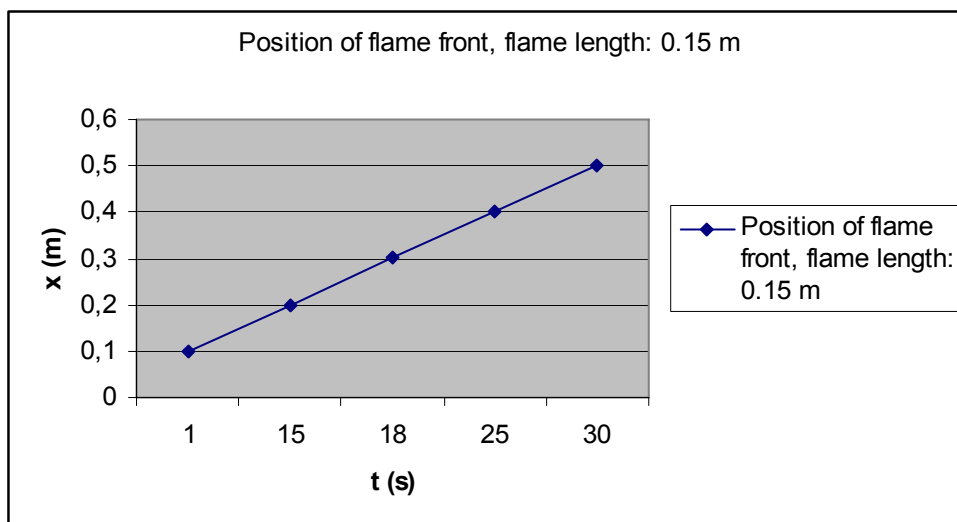
Brandfronten antas avancera till en ny bränslecell när temperaturen i bränslecellen är lika med eller överskrider 600 K [5]. Således antas temperaturen för antändning vara konstant.

Vid antändning av en bränslecell antas temperaturen omedelbart stiga till 1200K.

För att lösa ekvationen numeriskt, diskretiseras ekvationen genom att använda s.k. Forward Time Centered Space scheme (FTCS scheme) [36].

Under de inledande simuleringarna användes ett terrängavsnitt på 10 m och en tidsperiod av 35 sekunder.

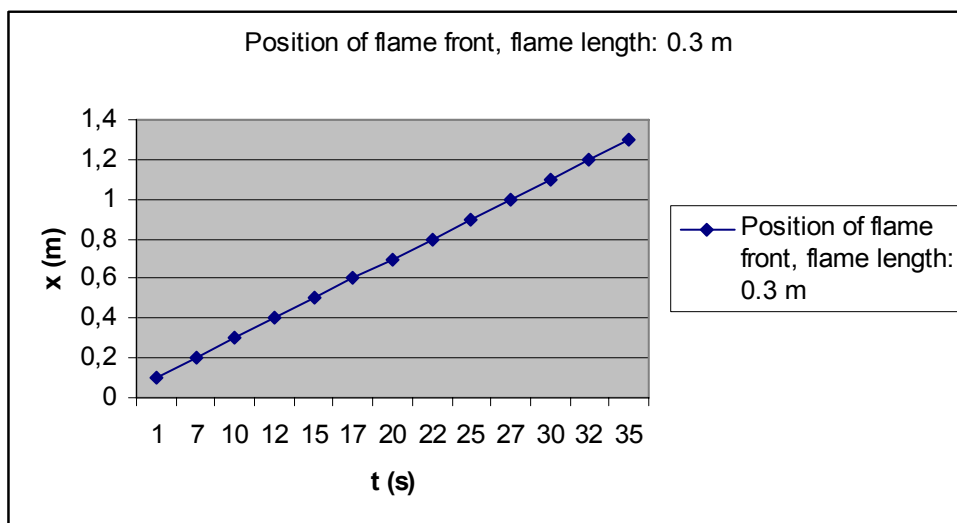
Följande resultat erhöles för en flamlängd på 0,15 m:



Figur 4. Flamfrontens position, flamlängd: 0,15 m.

Utifrån figuren ovan, beräknades spridningshastigheten: ~ 1 m/min.

Följande resultat erhöles för en flamlängd på 0,3 m:



Figur 5. Flamfrontens position, flamlängd: 0,3 m.

Utifrån figuren ovan, beräknades spridningshastigheten: ~ 2,2 m/min.

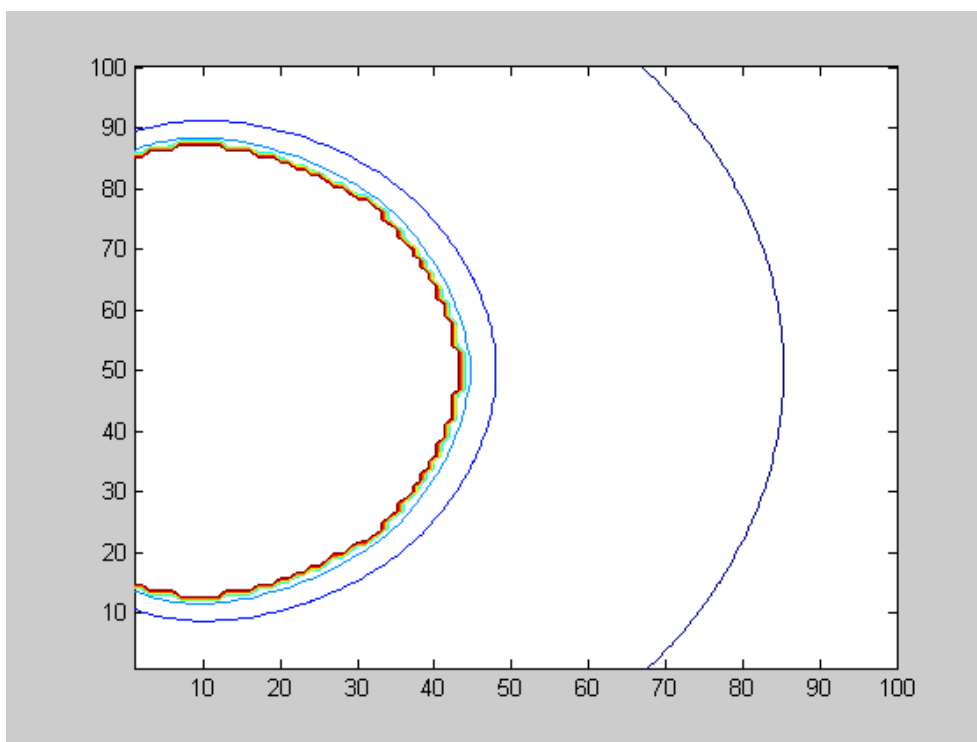
Som noterats från figurer och siffror ovan, kommer en längre flamlängd att leda till en snabbare spridning av en vegetationsbrand.

Observera också att spridningshastigheten är konstant, vilket inte är helt realistiskt då en vegetationsbrand kommer att genomgå en accelerationsfas i början av branden innan stationärt tillstånd uppnås. Den konstanta spridningshastigheten beror förmodligen på det faktum att arean på flammen framför bränslet är konstant under hela simuleringen.

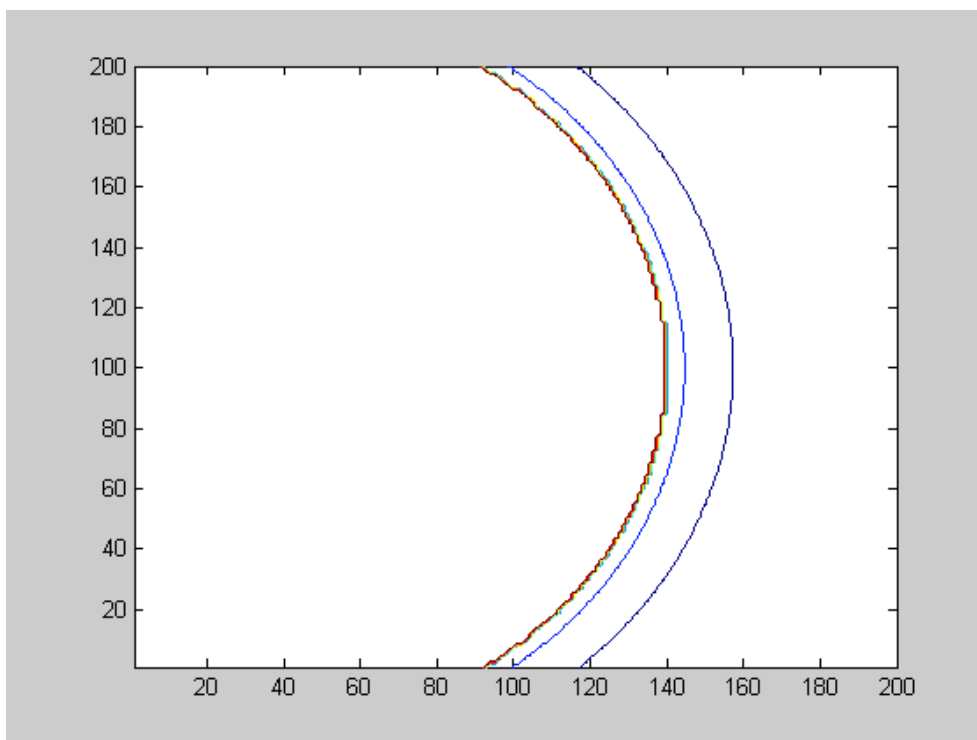
5.2 Tredimensionell modell

I det tredimensionella fallet används ett annorlunda uttryck för synfaktorn jämfört med det tvådimensionella fallet. Annars är metodiken likartad.

Följande resultat erhöles för en flamlängd på 0,15 m respektive 0,30 m (samma värden som för det tvådimensionella fallet) användes. Konturerna markerar olika temperaturer där den röda konturen markerar 1200 K och därmed eldbandet (som kan noteras ökar temperaturen snabbt i området strax intill branden):



Figur 6. Läget för flamfronten sett från ovan (röd linje) efter en tidsperiod av 35 sekunder och en flamlängd på 0,15 m (längdskalan i figuren är 0,1 m).



Figur 7. Läget för flamfronten sett från ovan (röd linje) efter en tidsperiod av 35 sekunder och en flamhöjd på 0,30 m (längdskalan i figuren är 0,1 m).

Som kan noteras utifrån de två graferna ovan är den genomsnittliga spridningshastigheten vid en flamhöjd på 0,15 m: ~ 7 m/min och vid en flamhöjd på 0,3 m: ~ 23 m/min.

För att undersöka om ovanstående siffror överensstämmer med uppmätta värden från testbränder (dvs. att validera modellen), gjordes jämförelser med uppmätta värden från testbränder genomförda i norra delen av Sverige [37]. Testbrännarna genomfördes i terrängavsnitt på 30x30 meter i storlek och med nästan ingen lutning. Följande spridningshastighet uppmättes vid lägsta vindhastighet (0,5 m/s) i vegetation av lingotyp och med en högsta flamhöjd på 0,8 m: 0.8-4.6 m/min.

Vid beräkning av flamhöjden användes Byram's ekvation [15] då vi fokuserar på markbränder i detta fall.

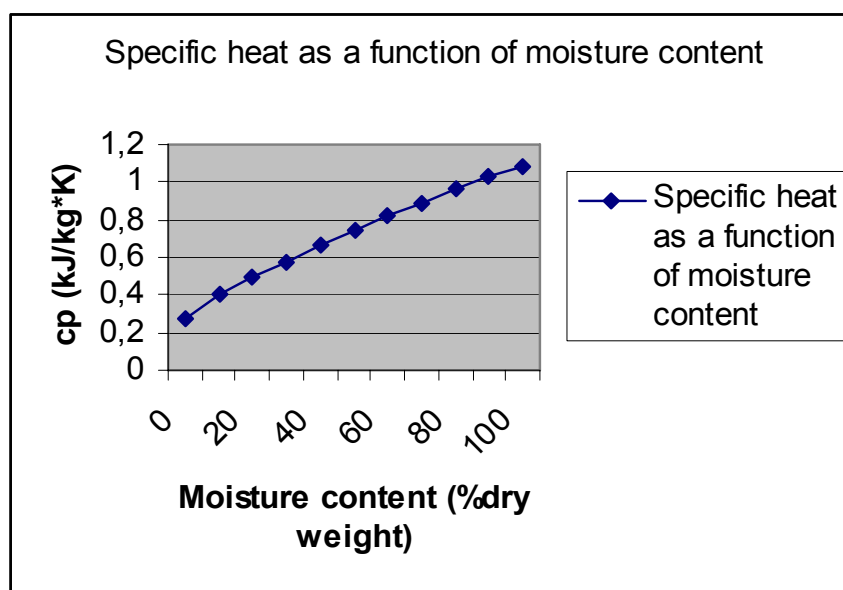
Vi kan notera att modellen överskattar spridningshastigheten jämfört med det uppmätta värdet.

Uppenbarligen är en av de stora nackdelarna med den föreslagna modellen bristen på specifika bränsledata för svenska förhållanden. Ett tillvägagångssätt vid validering av spridningshastigheten, skulle vara att variera bränslets specifika värme. Då tas större hänsyn till svenska förhållanden.

5.2.1 Variation av bränslets specifika värme

Ett sätt att beakta vissa av effekterna av fukthalten i bränsle skulle vara att variera specifika värmen för bränslet, eftersom den specifika värmen är en funktion av fukthalt och temperatur.

Figur 8 beskriver den specifika värmen för trä vid 100°C som en funktion av fukthalten.

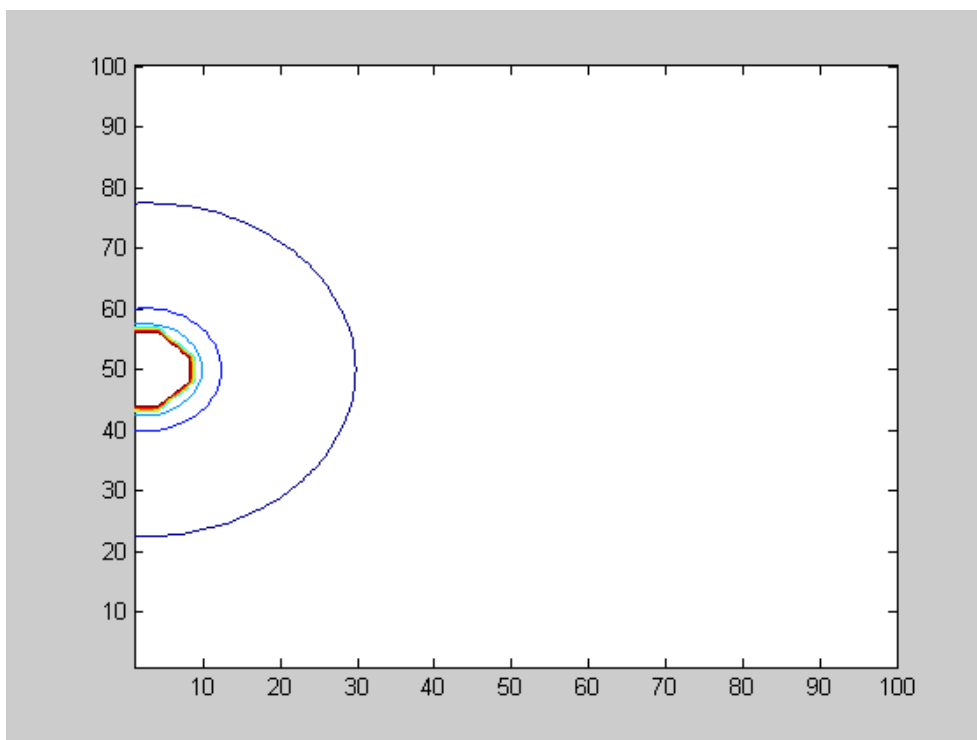


Figur 8. Den specifika värmen för trä (vid 100°C) som funktion av fukthalten [5].

Nästa steg skulle vara att stegvis öka den specifika värmen - med hjälp av en flamlängd på 0,8 m - tills den simulerade spridningshastigheten är lika med den nedre gränsen för det intervall som anges ovan (~ 0,8 m/min) efter den första 60 sekunder (utgick jag ifrån att spridningshastigheten kommer att öka som en funktion av bredden på flamfronten tills stationärt tillstånd har uppnåtts).

Jag fann att spridningshastigheten (simulerad) kom nära den övre delen av intervallet för spridningshastigheten (testbrand) när den specifika värmen var satt till ~ 13,4 kJ/kg·K. Se figur 9.

Värdet 13,4 kJ/kg·K är uppenbarligen inte ett realistiskt värde eftersom den är alltför stor. En slutsats är att felet inte enbart ligger hos specifika värmen utan hos andra parametrar också. Eftersom jag inte har tillgång till andra värden som är bättre anpassade för svenska förhållanden beslöt jag mig för att införa en kalibreringsfaktor istället för att ändra värdet på den specifika värmen. Detta kommer att göra den föreslagna modellen mer semi-empirisk men det visar också på svårigheten att erhålla tillräckligt tillförlitliga data till en fysikalisk modell.



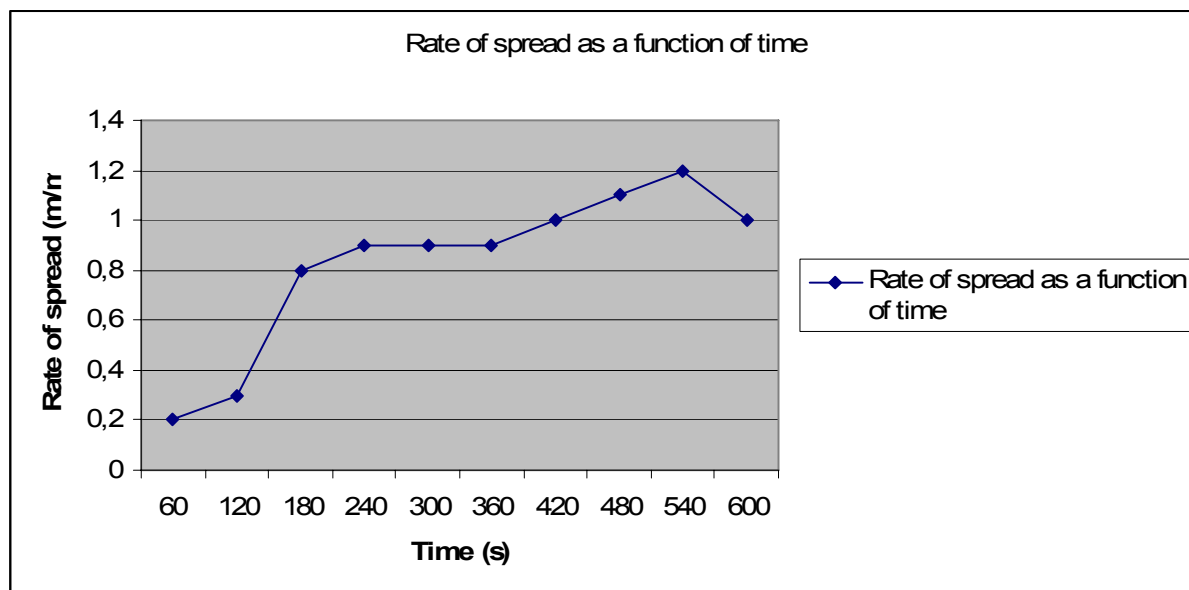
Figur 9. Läget för flamfront sett från ovan (röd linje) efter en tidsperiod av 60 sekunder och en låga höjd på 0,80 m (längd skala i siffran är 0,1 m).

5.2.2 Spridningshastigheten över tiden

Spridningshastigheten visar sig vara konstant efter ca 5-10 minuter vid en gräsbrand. I tyngre bränsle tar det längre tid innan spridningshastigheten blir konstant [5].

För att undersöka om spridningshastigheten blir konstant med tiden, genomfördes en serie simuleringar där en flamhöjd på 0,10 m användes. Bilaga 1 visar simuleringens resultat med 1 minuts mellanrum.

Utifrån resultaten från simuleringarna erhöles följande resultat vad gäller spridningshastigheten som funktion av tiden:



Figur 10. Spridningshastigheten som funktion av tiden.

I figur 10 noteras en accelererande fas i början av branden och sedan antar spridningshastigheten ett konstant värde. Resultatet av simuleringen visar alltså en konstant spridningshastighet över tiden.

5.2.3 Flammans lutning på grund av vindpåverkan

För att kunna simulera påverkan av en lutande flamma på grund av vindpåverkan och kunna validera modellen mot fler fall, användes den modell som beskrivs i artikeln A model for the wind-blown flame from a line fire av Albini [38].

Flammans lutningsvinkel används sedan i beräkningarna av synfaktorn för att beakta påverkan av vinden. Flammans lutningsvinkel används också i syfte att redovisa sluttningars påverkan, då påverkan av vind och lutning på branden i princip kommer att vara densamma (en lutande flamman med avseende på bränslebädden).

Två fall av testbränningar i norra Sverige [37] jämfördes med resultaten från simuleringarna för att undersöka påverkan av flammans lutning. I båda fallen var bränslet av lingontyp för att hålla bränsletypen konsekvent med tidigare simuleringar.

I det första fallet uppmättes vindhastigheten på 1,5 m höjd till 1,1 m/s. Den maximala flamlängden var ~ 1,0 m och spridningshastigheten var i intervallet 1.2-4.1 m/min.

I det andra fallet uppmättes vindhastigheten på 1,5 m höjd till 1,8 m/s. Den maximala flamlängden var ~ 1,2 m och spridningshastigheten var i intervallet 1.1-2.2 m/min.

I bilaga 2 redovisas de resulterande simuleringarna av det första fallet för de första två minuter och i bilaga 3 visas resultatet för det andra fallet. Då simuleringen för det andra fallet vid t: 120 sekunder var extremt lång (> 20 dagar) beslöt jag mig för att avbryta simuleringen.

Utifrån resultaten kunde följande slutsatser dras:

- Ju större lutningsvinkel, ju större spridningshastighet.
- Den föreslagna modellen överskattar uppenbarligen spridningshastigheten vid en ökning av lutningsvinkeln.

En orsak till den höga spridningshastigheten är det faktum att jag har använt synfaktorn för det lutande fallet i alla riktningar, det är uppenbart att det endast gäller i vindriktningen. Formen på en vegetationsbrand bör vara en ellips i stället för en cirkel om branden påverkas av vinden. Ytterligare förbättringar kan därför göras av programmet.

5.2.4 Variation av eldbandets intensitet

Då flamhöjden har en direkt koppling till eldbandets intensitet, varierades flamhöjden för att undersöka effekten av eldbandets intensitet på spridningshastigheten. Följande flamhöjder undersöktes: 0,3 m, 0,6 m och 0,9 m. Se bilaga 4 för resultaten.

Utifrån resultatet kan man se att med en ökning av flamhöjden kommer också spridningshastigheten att öka. Tillsammans med resultaten av lutningsvinkelns inverkan, är således en slutsats att flamstrålningen är bland de främsta drivkrafterna när det gäller spridningshastigheten.

Detta gäller så länge vinkeln mellan flamman och bränslet framför är lägre än 30 grader, ty i det fallet lyfter inte flamman från bränslet [5]. Konvektionen är den dominerande kraften i det fallet.

Vid användning av en större flamlängd krävs en bredare flamfront för att uppnå en konstant spridningshastighet (en konstant spridningshastighet kommer således att ske senare i tiden). Detta beror på det faktum att en större flamlängd kommer att resultera i en större synfaktor [5].

Den största nackdelen med modellen är att flamhöjden dvs eldbandets intensitet matas in av användaren och varierar inte under simuleringen. Detta är naturligtvis inte realistiskt och måste arbetas vidare med vid en utveckling av modellen. Ett mycket bättre sätt vore att låta modellen beräkna flamhöjden baserat på indata såsom bränsle, vindhastigheten etc.

5.2.5 Beräkningstid

En Intel (R) Pentium (R) M processor på 2,00 GHz, 1,00 GB RAM användes under simuleringarna.

Som en indikation på omfattningen av beräkningstiden, tog simulationen för det andra vindfallet (vindhastighet på 1,8 m/s och en flamlängd på 1,2 m) ca 3 timmar för de första 60 sekunder och för ett gridsystem av storleken 200x200.

För de första 120 sekunder och ett gridsystem av storleken 500x500, tog simuleringen ungefär 90 timmar.

På grund av den mycket långa beräkningstiden är modellen för närvarande inte lämplig för operativ användning.

6. Analys och diskussion

De statistiska modellerna gör inga försök att involvera fysikaliska processer, eftersom de endast är en statistisk beskrivning av testbränder. För dem saknas en fysikalisk grund, vilket betyder att statistiska modeller måste användas med stor försiktighet utanför de förhållanden som de verifierats för.

Ytterligare en nackdel med statistiska modeller är det faktum att icke-linjära samband mellan variablerna förloras i den nödvändiga linjäriseringsprocessen.

En stor fördel med den statistiska modellen FBP skulle vara den nära kopplingen till FWI-systemet. Flera underindex från FWI-systemet kan användas för beräkningar i FBP systemet. Alltså kommer en användning av FBP-systemet att kräva mindre tid och resurser när det gäller insamling av nödvändiga indata.

En annan fördel skulle vara att statistiska modeller inte är beräkningsintensiva.

Semi-empiriska modeller baseras ofta på principen om energins bevarande, men gör inte någon skillnad mellan ledning, konvektion eller strålningsvärme. Den semi-empiriska modellen är inte beräkningsintensiv och innehåller variabler som i allmänhet är lätta att mäta ute i terrängen. Trots de problem som finns med begränsad precision, gör modellernas snabbhet och enkelhet dem användbara för operativ användning.

Rothermels modell är ett exempel på en semi-empirisk modell som har använts i hela världen under flera decennier och utgjort värdefullt beslutsstöd vid flera vegetationsbränder. Rothermels modell kan mycket väl tjäna som exempel för en svensk modell.

Fysikaliska modeller har den fördelen att de är baserade på kända fysikaliska förhållanden och därmed underlättas deras användning utanför området som de testats för. Således kan vi förvänta oss att fysikaliska modeller skulle ge de mest exakta prognoserna och ha största användbarhet.

Arbetet med fysikaliska modeller lider av exempelvis brist på förståelse av flera fysikaliska processer, såsom karakterisering av de kemiska processer som äger rum vid förbränning, flammors egenskaper samt kvantifiering av fysikaliska processer som reglerar värmeöverföringen.

De indata som finns tillgängliga idag är i allmänhet inte tillräckligt detaljerade för användning i fysikaliska modeller. Därför är en fysikalisk modell för operativ användning inte en verklighet i nuläget.

En idé vore att använda en fysikalisk modell som grund, men där man satt några av koefficienterna till noll, vilket gör den mer av semi-empirisk typ. Då mera exakt indata blir tillgänglig, och ingående fysikaliska mekanismer lättare att förstå etc. kan de tidigare "inaktiverade" delarna inkluderas i modellen vilket gör den mer och mer till en fysikalisk modell.

En reflektion här är att baserat på ovanstående beskrivningar av de tre olika typerna av modeller, skulle en semi-empirisk modell vara det optimala valet för Sverige då till exempel de statistiska modellerna har stora begränsningar.

De indata som finns tillgängliga idag är i allmänhet inte tillräckligt utförliga för användning i fysikaliska modeller. Som ett resultat kommer en mycket detaljerad fysikalisk modell fortfarande bara ge oprecisa prognoser. Allt eftersom bättre och mer detaljerad indata kommer att finnas tillgängliga, kommer användning av fysikaliska modeller att vara mer motiverade. De indata som i allmänhet inte är tillräckligt utförliga är väder och bränsle. Med avseende på väder vore en idealisk lösning att använda tillgängliga väderdata från nuvarande FWI-systemet. Men problemen med det befintliga FWI-systemet är den grova gridstorleken och det faktum att de endast uppdateras en gång om dagen. Så frågan är hur väl systemet tar variationer i tid och rum i beaktande.

"Alarm"-projektet skulle mycket väl kunna ge lösningen på detta problem och ge väderdata som uppdateras en gång i timmen från lokala väderstationer.

När det gäller bränslet kommer användningen av satellitbilder och flygbilder att kraftigt förenkla processen och spara både tid och resurser. Men det finns fortfarande ett stort behov av ny teknik vad gäller satellitbilder, flygbilder och bildtolkning då ett stort problem som måste lösas är att kunna skilja mellan kronskiktet och markbränslet. Ny teknik visar på lovande resultat.

När det gäller den föreslagna fysikaliska modellen så överskattade den spridningshastigheten jämfört med uppmätta värden även efter ett försök att kalibrera modellen. Mest sannolika skäl för detta resultatlösa försök att simulera spridningen är:

- Allmän brist på tillförlitlig och användbar indata.
- Modellen är i vissa avseenden alltför enkel (exempelvis ingår ingen reaktionskemi).

En stor nackdel med modellen är att flamlängden - dvs eldbandets intensitet – matas in av användaren och varierar inte under simuleringen. Detta är naturligtvis inte realistiskt och måste arbetas med vid vidareutvecklingen av modellen.

För mycket små terrängavsnitt blev beräkningstiden otroligt lång, så den föreslagna modellen är för närvarande inte för operativ användning. Det är nödvändigt att modellen görs mera exakt och utarbetas för operativ användning.

7. Slutsatser

7.1 Slutsatser

För Sverige rekommenderas att en semi-empirisk modell utvecklas. Denna slutsats grundar sig på följande faktorer:

- Precisionen i en semi-empirisk modell är i allmänhet mycket bättre än för en statistisk modell. Dessutom är området där modellen är användbar mycket bredare för en semi-empirisk modell än för en statistisk modell.
- Den mängd arbete som krävs för att utveckla en semi-empirisk modell kommer inte skilja sig mycket från den mängd arbete som krävs för en statistisk modell. I båda fallen kommer ett antal testbränder att behöva genomföras för att definiera och kalibrera ett antal bränslemodeller representativa för Sverige.
- För närvarande är prestanda och tillämpning av fysikaliska modeller inte på en acceptabel nivå (till följd av exempelvis den komplexitet som modellen innebär och den datorkraft som finns hos de flesta datorer i dag) för operativ användning.

En svensk semi-empirisk modell bör från början baseras på svenska förhållanden (dvs. på den typ av vegetation som finns i Sverige) i stället för att försöka bygga in lokala svenska förhållanden i en befintlig modell. Detta skulle sannolikt ge bäst resultat för svenska förhållanden.

Den semi-empiriska modellen skulle kunna omfatta två delmodeller, en modell som förutspår spridningshastigheten för en markbrand och en modell som förutspår spridningshastigheten för en eventuell toppbrand. Kopplingen mellan de två delmodellerna bör baseras på fysikaliska samband, vilket gör det mer till en fysikalisk modell.

Parallellt med arbetet med en semi-empirisk modell, bör det arbetas på ett system för bättre indata – väder- och bränsledata. Detta kan till exempel resultera i tillhandahållande av mer lokaliserad väderdata som uppdateras regelbundet.

Arbetet med den föreslagna fysikaliska modellen betonar behovet av korrekta och användbara indata samt också en av de stora nackdelarna med fysikaliska modeller, den mycket långa beräkningstiden.

7.2 Fortsatt arbete

Om en vegetationsbrandmodell skall utvecklas, så rekommenderas att detta görs i samarbete med motsvarande organisationer i grannländer som Norge och Finland. Detta kommer att vara kostnadseffektivt och kommer inte att påverka resultatet eftersom vegetationen är likartad i de tre länderna.

En arbetsgrupp bör inrättas med sakkunniga inom brandfysik, ekologi, GIS etc. Förutom arbetet med potentiella bränsletyper, modellering av fysikaliska förhållanden etc. kommer en viktig del av arbetet att omfatta testbränningar. Eftersom utvecklingen av modellen troligtvis kommer att kräva ett stort antal testbränningar, kommer det med största sannolikhet att ta flera år innan den slutliga produkten blir lämplig för operativ användning. Ett system för insamling av data från vegetationsbränder, som inte är testbränningar, är viktigt att etablera för att uppdatera och förbättra en framtida modell för vegetationsbränder. För att få in data för kalibrering och korrigering av en framtida svensk modell, bör viktiga indata ingå i insatsrapportformuläret. Arbetet med att samla in indata bör starta långt före utvecklingen av modellen för att inkludera variationer i tiden under ett längre intervall.

Ett system för bättre indata, väder och bränsledata, bör också utarbetas. Detta kunde exempelvis dra nytta av resultaten av det mycket lovande "Alarm"-projektet som sker i västra delen av Sverige.

Med hjälp av väderdata från "Alarm"-projektet skulle mera lokaliserad väderdata erhållas med regelbundna uppdateringar.

När det gäller frågan om bättre bränsledata, måste ny teknik för satellitbilder, flygbilder och bildtolkning övervakas då ett stort problem som måste lösas är att urskilja mellan kronskiktet och markbränslet.

Även om det beslutas att gå vidare med arbetet med en semi-empirisk modell, bör den pågående utvecklingen av fysikaliska modeller runt om i världen övervakas. Då ökad datorkapacitet, mera raffinerad indata etc. en dag kan möjliggöra en fysikalisk modell för operativ användning är arbetet med FIRETEC och WFDS särskilt intressant och lovande.

8. Referenser

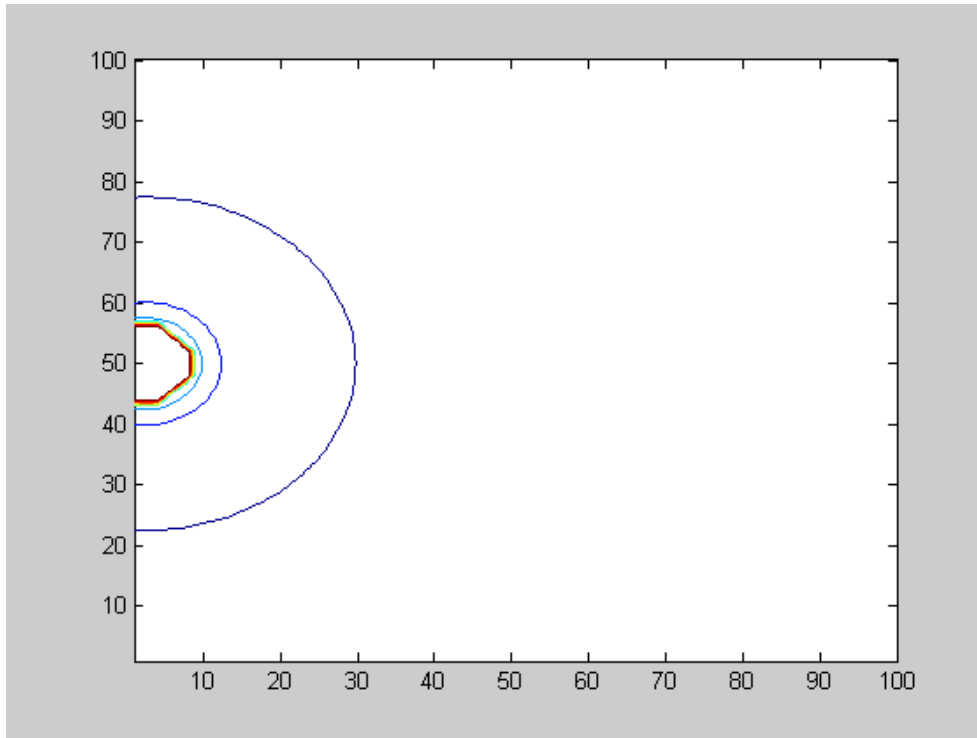
- [1] Hirsch K.G. (1996). *Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System: user's guide*.
Vancouver: UBC Press
- [2] Sullivan A.L. (2007). *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present. 3: Mathematical analogues and simulation models*.
Ensis Bushfire Research, Kingston, Australia
- [3] Fons W.L. (1946). *Analysis of fire spread in light forest fuels*.
Journal of Agricultural Research, volume 72, pp 93-121
- [4] Sullivan A.L. (2007). *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present. 1: Physical and quasi-physical models*.
Ensis Bushfire Research, Kingston, Australia
- [5] Chandler G.C. (1991), *Fire in forestry*, vol.1 & 2, New York, John Wiley & Sons
- [6] Weber R.O. (1991). *Modelling fire spread through fuel beds*.
Prog. Energy Combustion Science, volume 17, pp 67-82
- [7] Mell W. et al. (2006). *A physics-based approach to modelling grassland fires*.
Forest Ecology and Management, volume 234, supplement 1, page S82
- [8] Van Wagner C.E. (1977). *Conditions for the start and spread of a crown fire*.
Canadian Journal of Forest Research, volume 7, pp 23-24
- [9] Beer T. (1991). *Bushfire rate-of-spread forecasting: deterministic and statistical approaches to fire modelling*.
Journal of Forecasting, volume 10, pp 301-317
- [10] Linn R.R. (1997). *A transport model for prediction of wildfire behavior*.
PhD thesis, Los Alamos National Laboratory
- [11] Sun R. et al. (2006). *An evaluation of fire-plume properties simulated with the fire dynamics simulator (FDS) and the Clark coupled wildfire model*.
Canadian Journal of Forest Research, volume 36, pp 2894-2908

- [12] Rothermel R.C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*.
USDA Forest Service, Research paper INT-115
- [13] Frandsen W.H. (1971). *Fire spread through porous fuels from the conservation of energy*.
Combustion and Flame, volume 16, pp 9-16
- [14] Perry G.L.W. (1998). *Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review*.
Progress in Physical Geography, volume 22, pp 222-245
- [15] Byram G.M. (1959). *Combustion of forest fuels*.
New York, McGraw-Hill Book Co.
- [16] Rothermel R.C. (1991). *Crown fire analysis and interpretation*.
USDA Forest Service
- [17] Cruz M.G. et al. (2002). *Predicting crown fire behavior to support forest fire management decision-making*.
In: Viegas D.X., ed. *Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*. Rotterdam: Millpress Scientific Publications: 1-10
- [18] Pastor E. et al. (2003). *Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour*.
Progress in Energy and Combustion Science, vol. 29, pp 139-153
- [19] Cruz M.G. et al. (2004). *Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands*.
Forest Science, volume 50, pp 640-658
- [20] Albini F.A. (1986). *Wildland Fire Spread By Radiation – a Model Including Fuel Cooling by Natural Convection*.
Combustion Science and Technology, volume 45, pp 101-113
- [21] Albini F. (1996). *Iterative solution of the radiation transport equations governing spread of fire in wildland fuel*.
Combustion, Explosion and Shock Waves, volume 32, pp 534-543
- [22] Albini F.A. (1994). *Program BURNUP: A simulation model of the burning of a large woody natural fuels*.
Montana State University, Research paper INT-92754-GR
- [23] Clark T.L. et al. (2004). *Description of a coupled atmosphere-fire model*.
International Journal of Wildland Fire, volume 13, pp 49-63

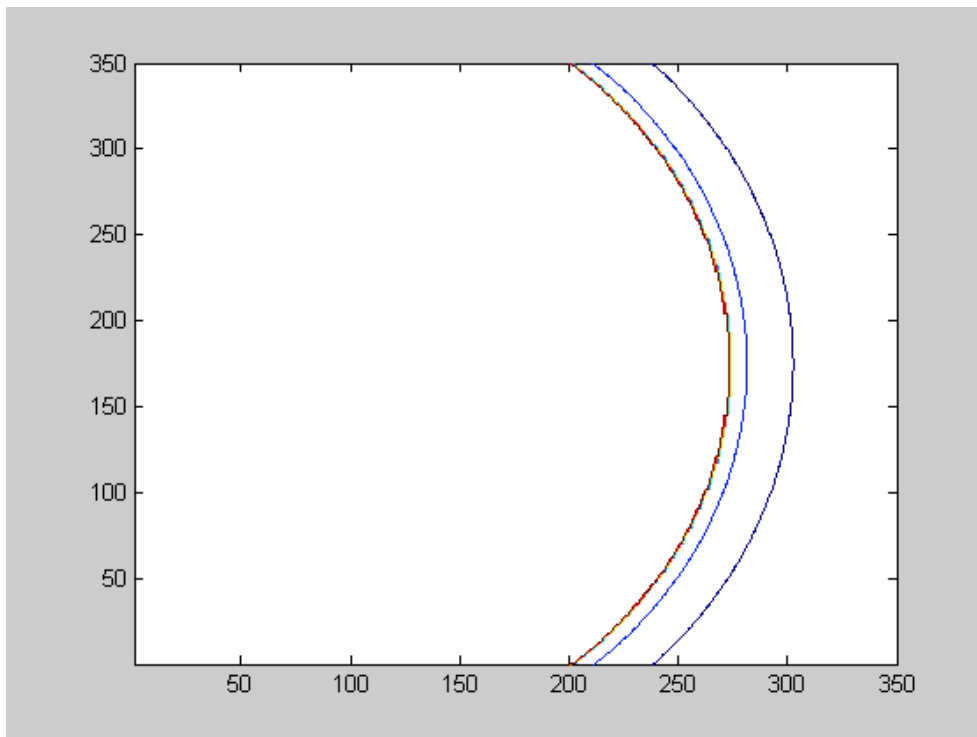
- [24] Grishin A.M. et al. (1983). *Mathematical modelling of the spread of high-level forest fires.*
Soviet Physics Doklady, volume 28, pp 328-330
- [25] Grishin A.M. et al. (2002). *Mathematical Model for Spread of Crown Fires in Homogenous Forests and along Openings.*
Combustion, Explosion, and Shock Waves, volume 38, No 6, pp 622-632
- [26] Balbi et al. (1999). *Dynamic Modelling of Fire Spread Across a Fuel Bed.*
International Journal of Wildland Fire, volume 9, pp 275-284
- [27] Morvan D. et al. (2001). *Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation.*
Combustion and flame, volume 127, pp 1981-1994
- [28] Dupuy J-L. et al. (1999). *Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects.*
International Journal of Wildland Fire, volume 9, pp 155-172
- [29] Sun R. et al. (2006). *An evaluation of fire-plume properties simulated with the Fire Dynamics Simulator (FDS) and the Clark couples wildfire model.*
Canadian Journal of Forest Research, volume 36, pp 2894-2908
- [30] Linn R. et al. (2002). *Studying wildfire behavior using FIRETEC.*
International Journal of Wildland Fire, volume 11, pp 233-246
- [31] *Unik spridningsmodell integreras med Rib. Sirenen.* August 2007, pp 6
- [32] Keane R.E. et al. (2001), *Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling.*
International Journal of Wildland Fire, vol. 10, pp 301-319
- [33] Oswald B.P. et al (1999), *Classifying fuels with aerial photography in east Texas.*
International journal of wildland fire, vol 9, pp 109-113
- [34] Weinstein D. et al. (1995), *Fire growth modeling in an integrated GIS environment.*
ESRI conference paper.

- [35] Wimberly M.C. et al. (2003), *A multivariate approach to mapping forest vegetation and fuels using GISdatabases, satellite imagery, and forest inventory plots.*
2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress
- [36] Garcia A. L. (2000), *Numerical Methods for Physics.*
Prentice-Hall, New Jersey
- [37] Granström A. et al. (1998), *Utvärdering av det kanadensiska brandrisksystemet.* Statens Räddningsverk, Karlstad
- [38] Albini F.A. (1981), *A model for the wind-blown flame from a line fire.*
Combustion and Flame, vol. 43, pp 155-174

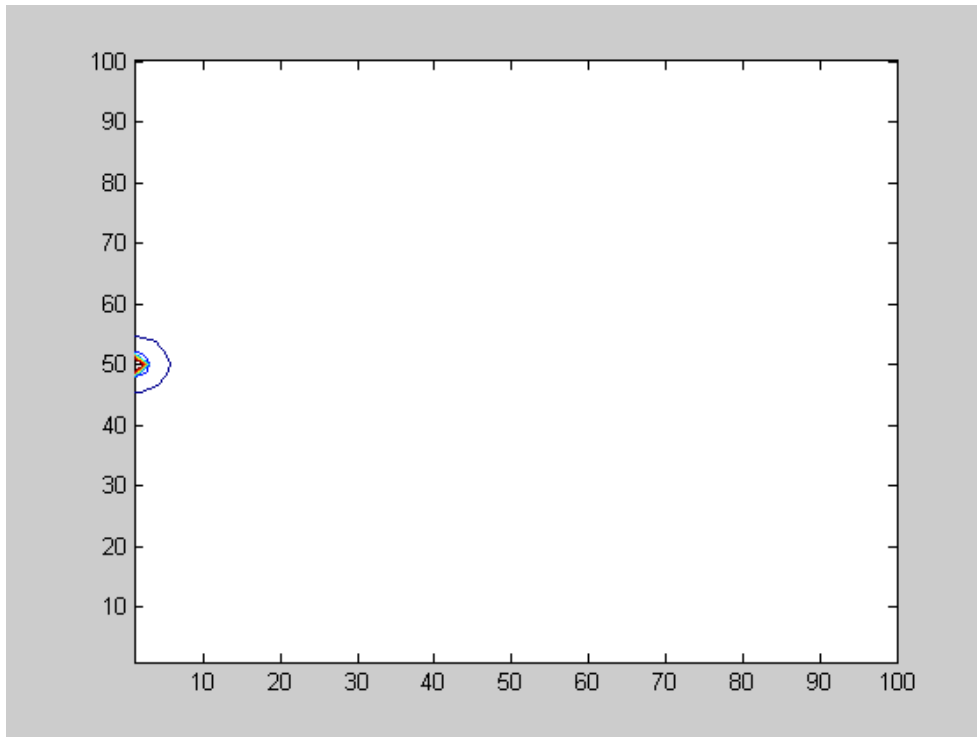
Bilaga 1



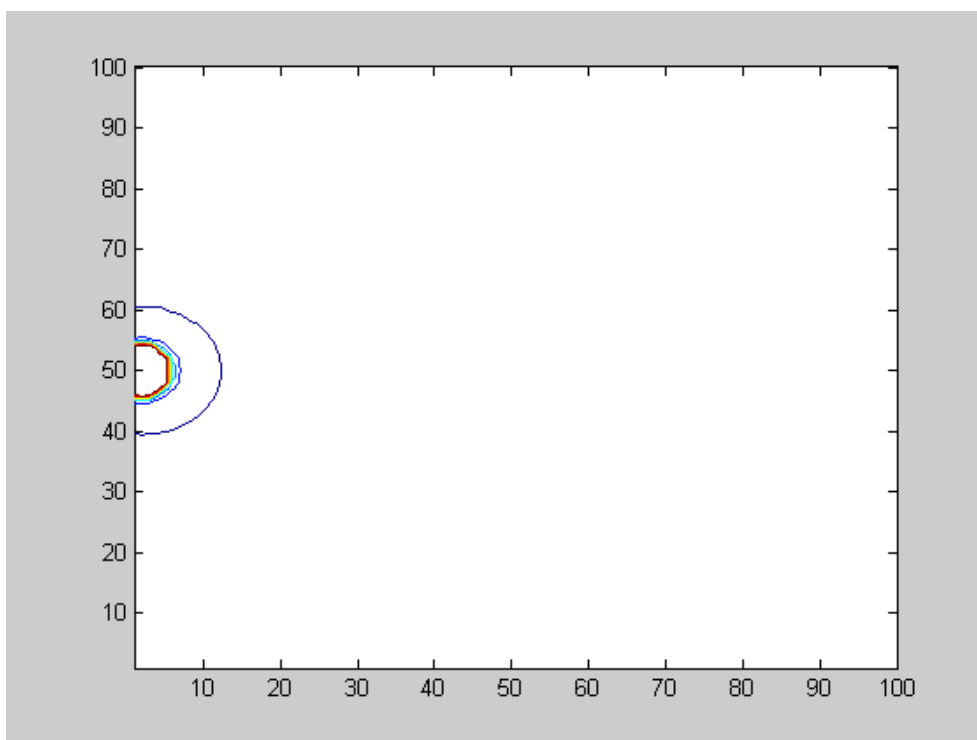
Flamlängd: 0.8 m; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



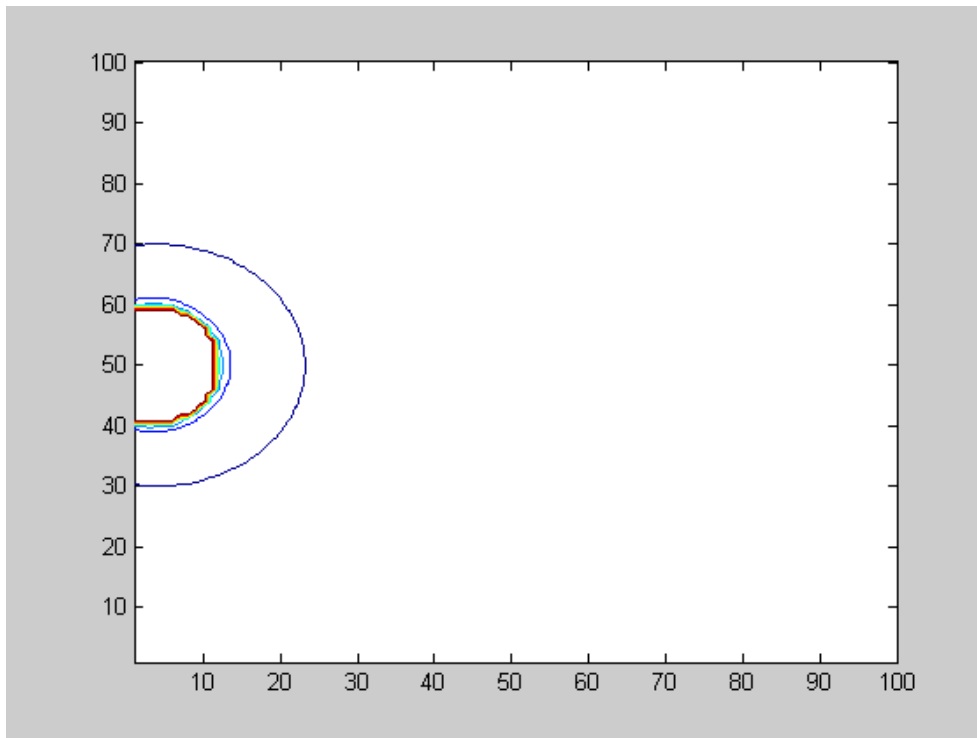
Flamlängd: 0.8 m; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).



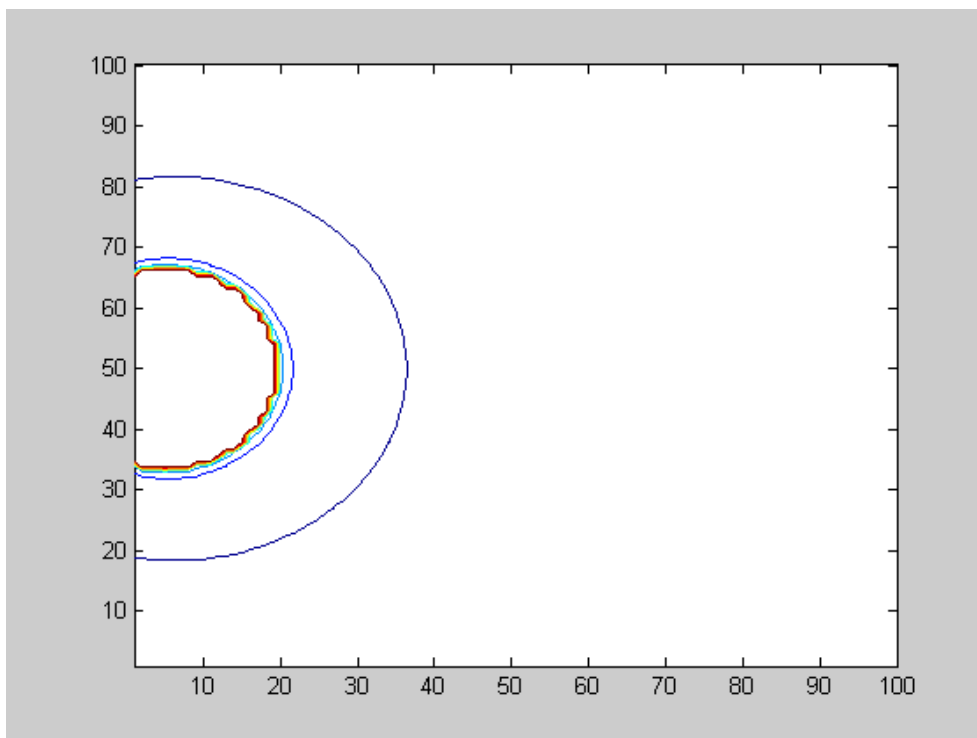
Flamlängd: 0.1 m; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



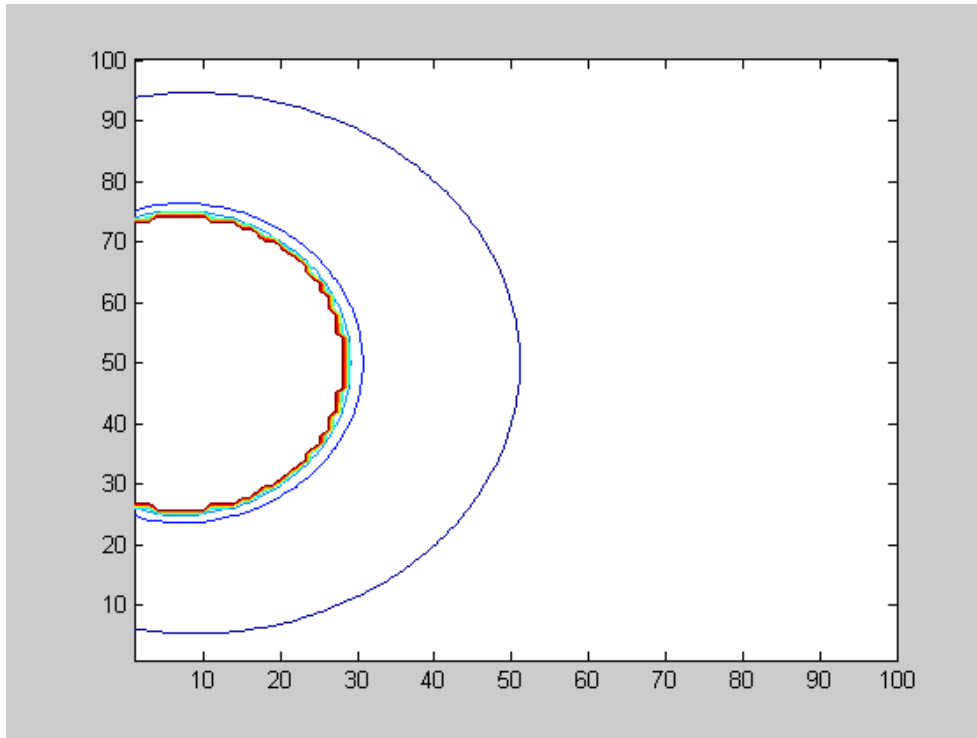
Flamlängd: 0.1 m; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).



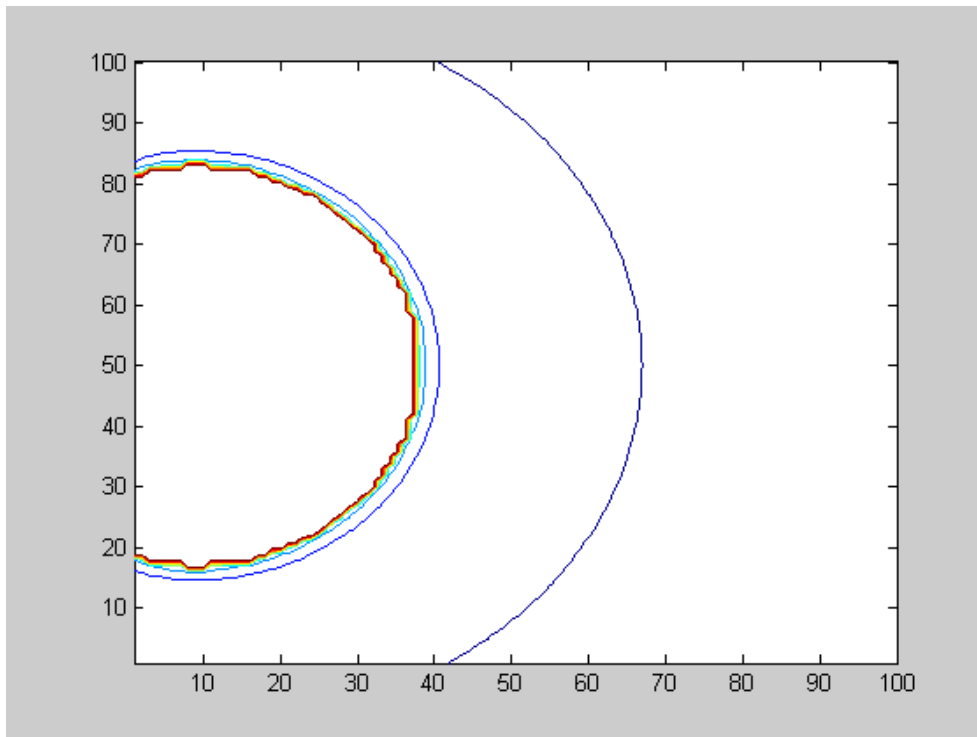
Flamlängd: 0.1 m; t: 180 sekunder (längdskala: 0.1 m).



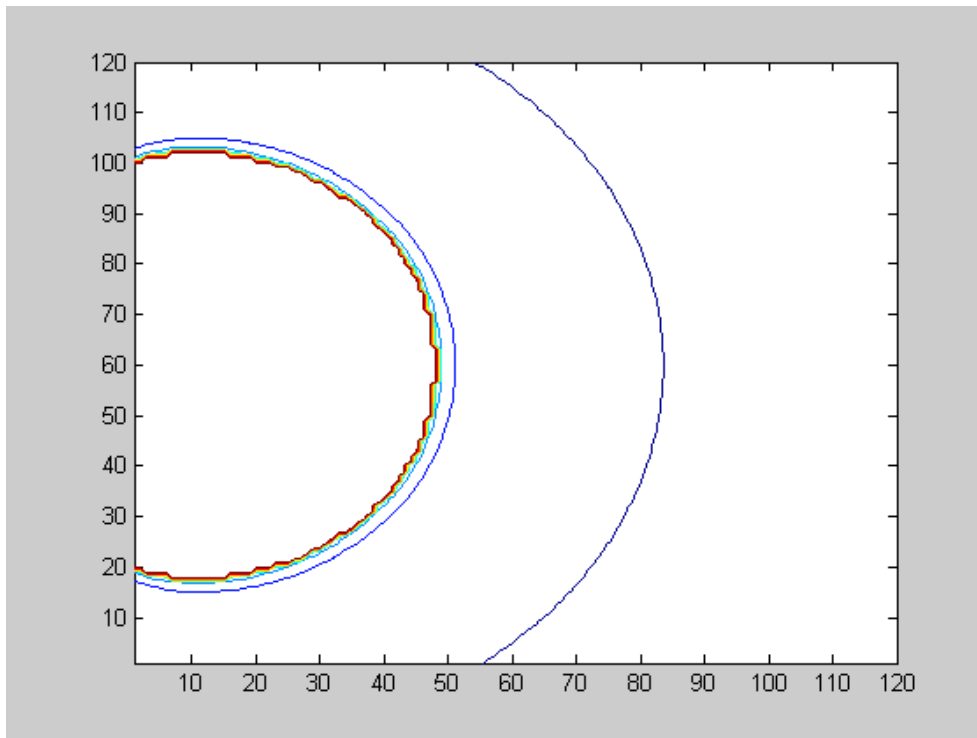
Flamlängd: 0.1 m; t: 240 sekunder (längdskala: 0.1 m).



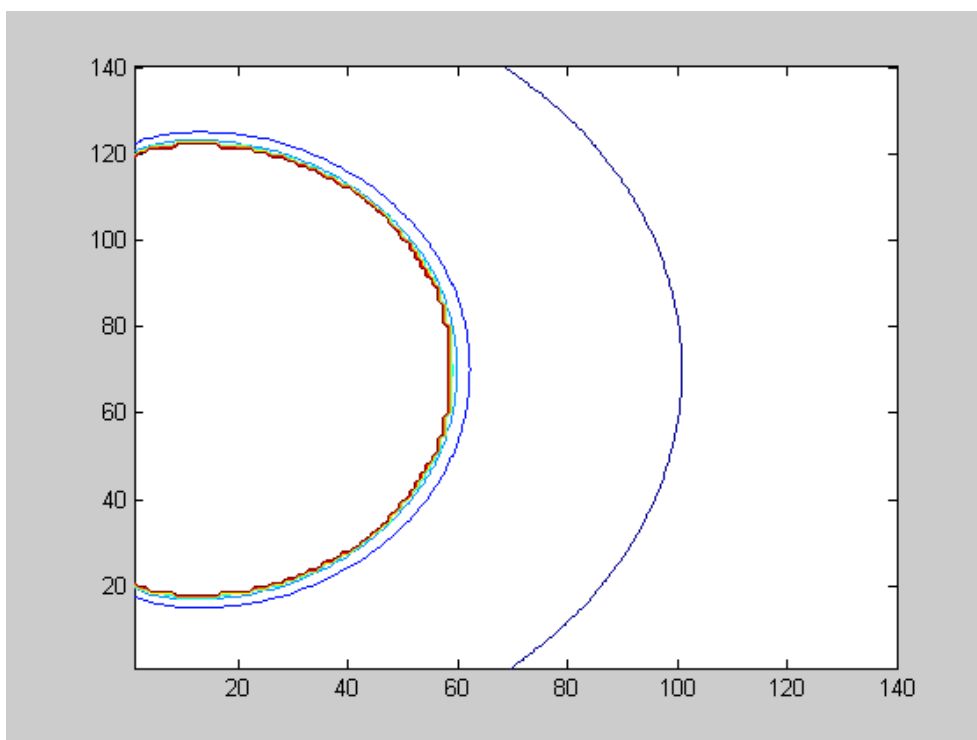
Flamlängd: 0.1 m; t: 300 sekunder (längdskala: 0.1 m).



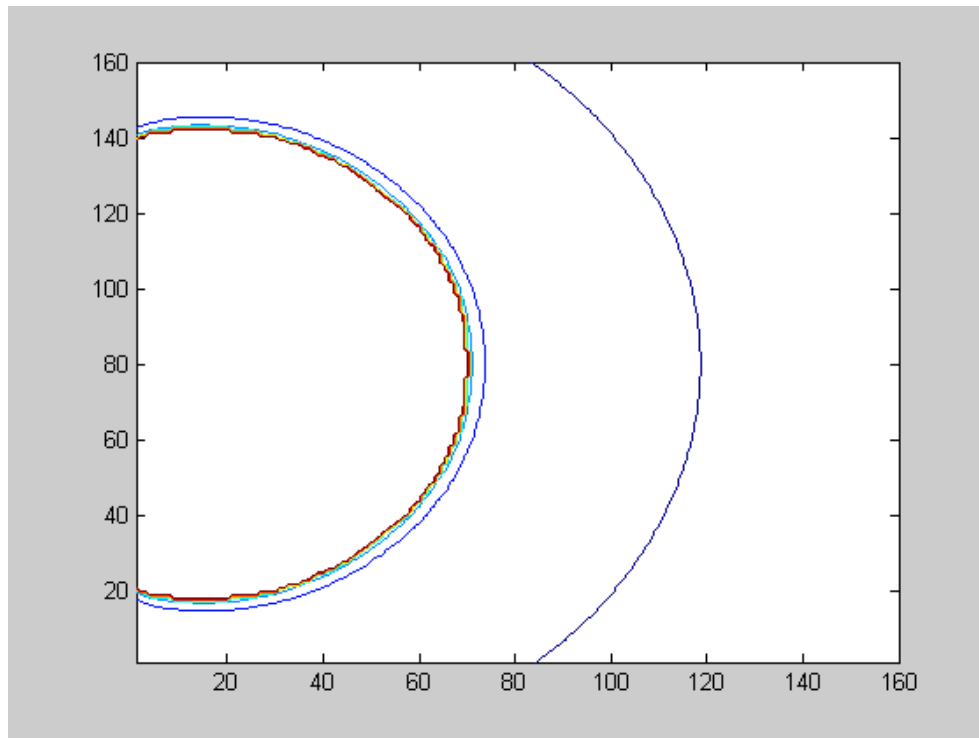
Flamlängd: 0.1 m; t: 360 sekunder (längdskala: 0.1 m).



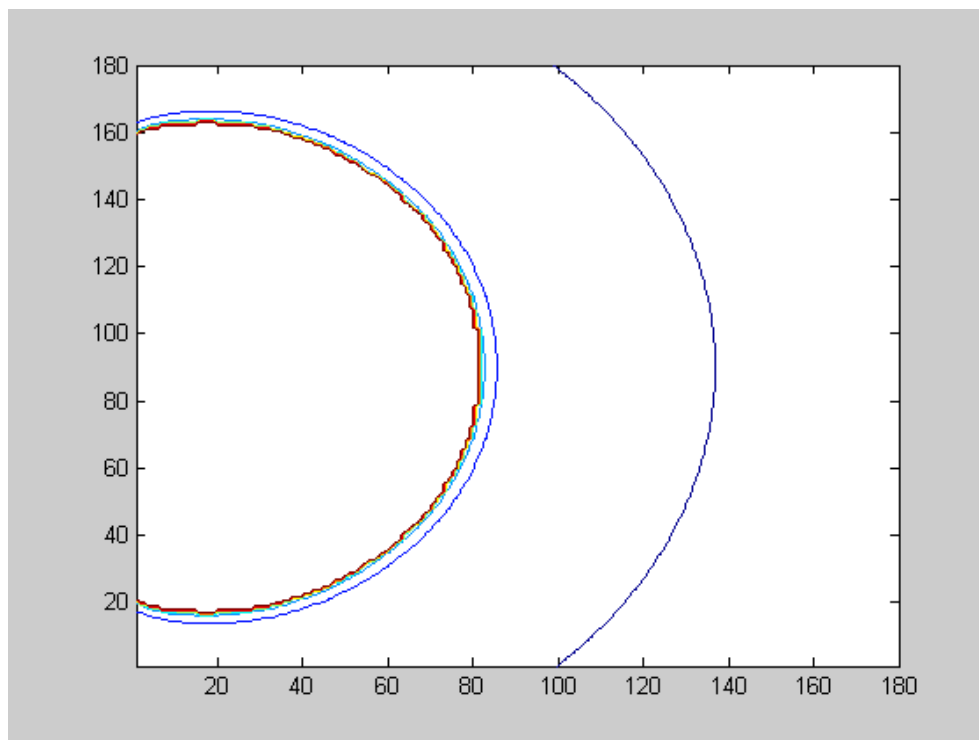
Flamlängd: 0.1 m; t: 420 sekunder (längdskala: 0.1 m).



Flamlängd: 0.1 m; t: 480 sekunder (längdskala: 0.1 m).

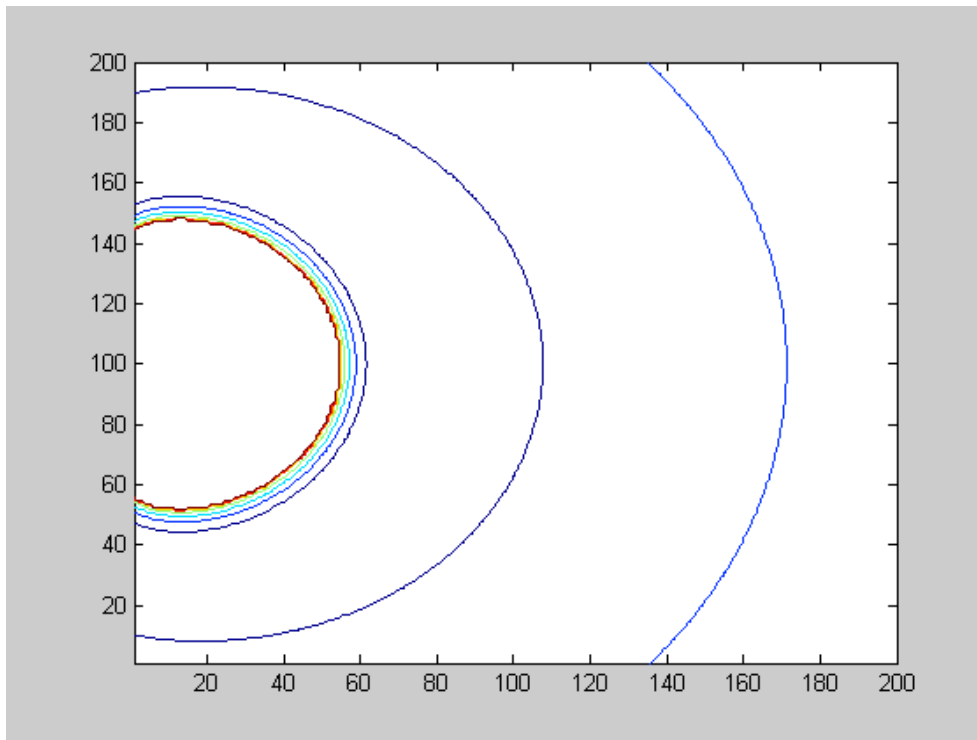


Flamlängd: 0.1 m; t: 540 sekunder (längdskala: 0.1 m).

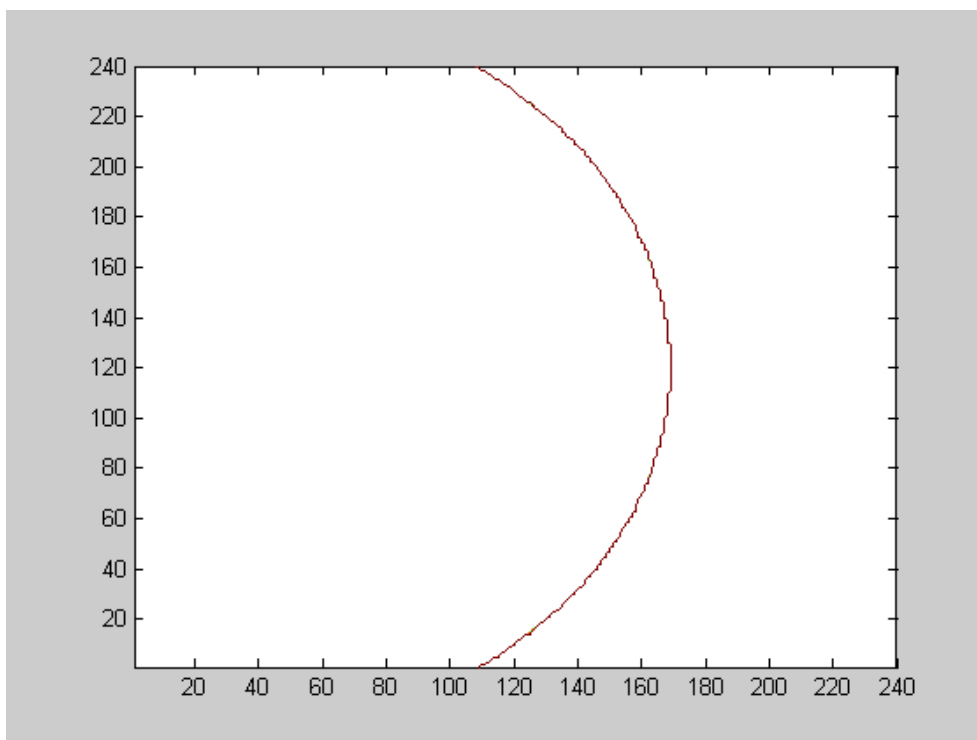


Flamlängd: 0.1 m; t: 600 sekunder (längdskala: 0.1 m).

Bilaga 2

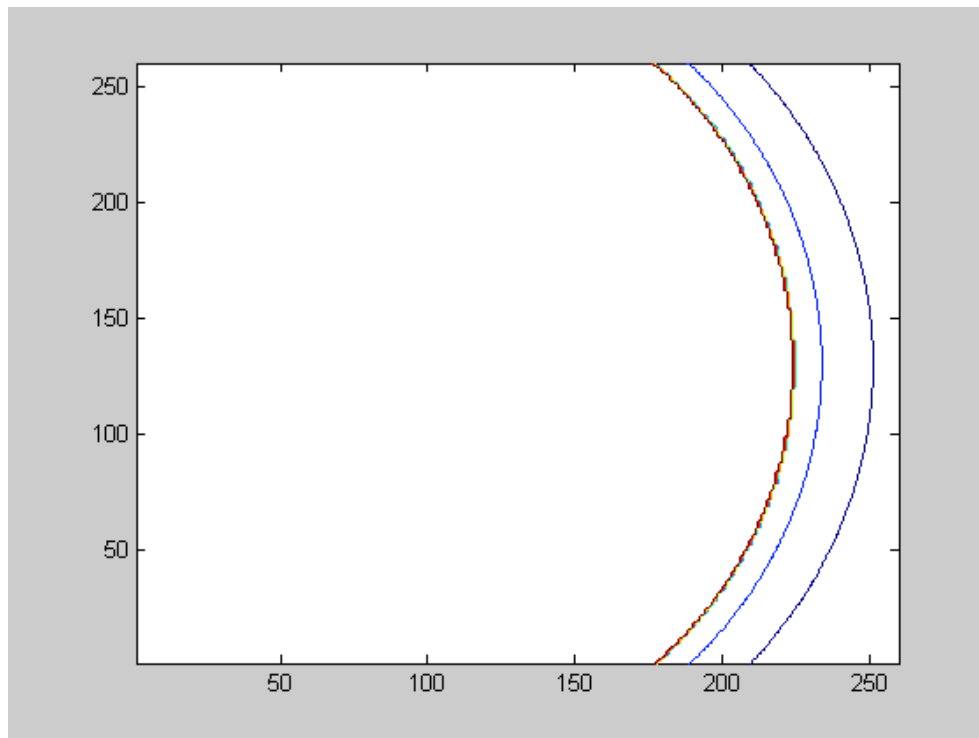


Flamlängd: 1.0 m; vindhastighet: 1.1 m/s; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



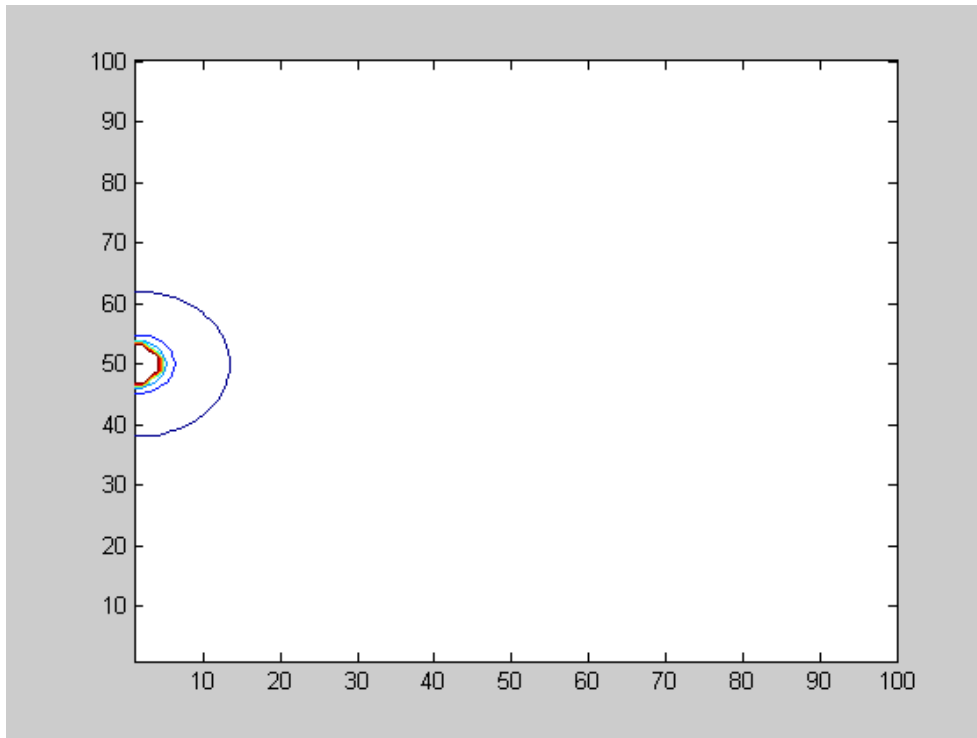
Flamlängd: 1.0 m; vindhastighet: 1.1 m/s; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).

Bilaga 3

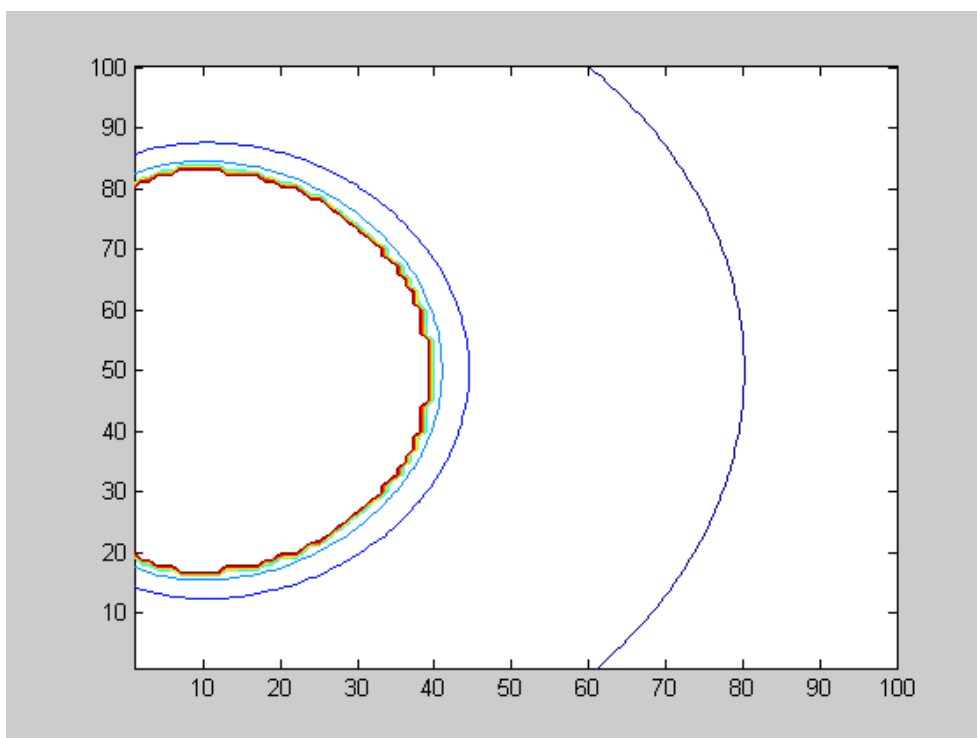


Flamlängd: 1.2 m; vindhastighet: 1.8 m/s; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).

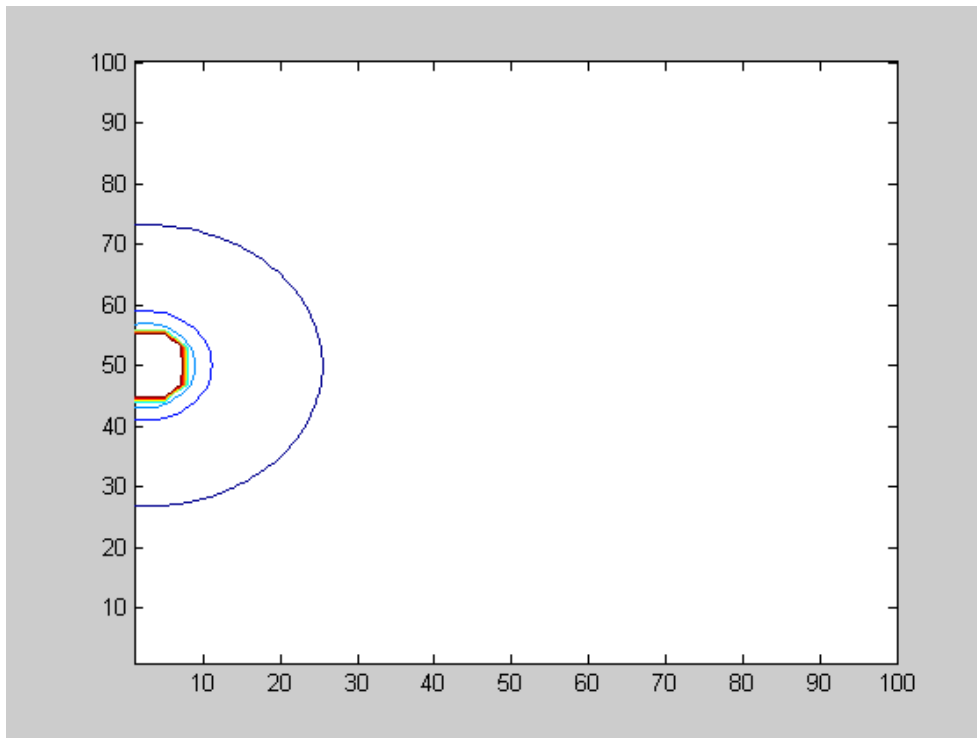
Bilaga 4



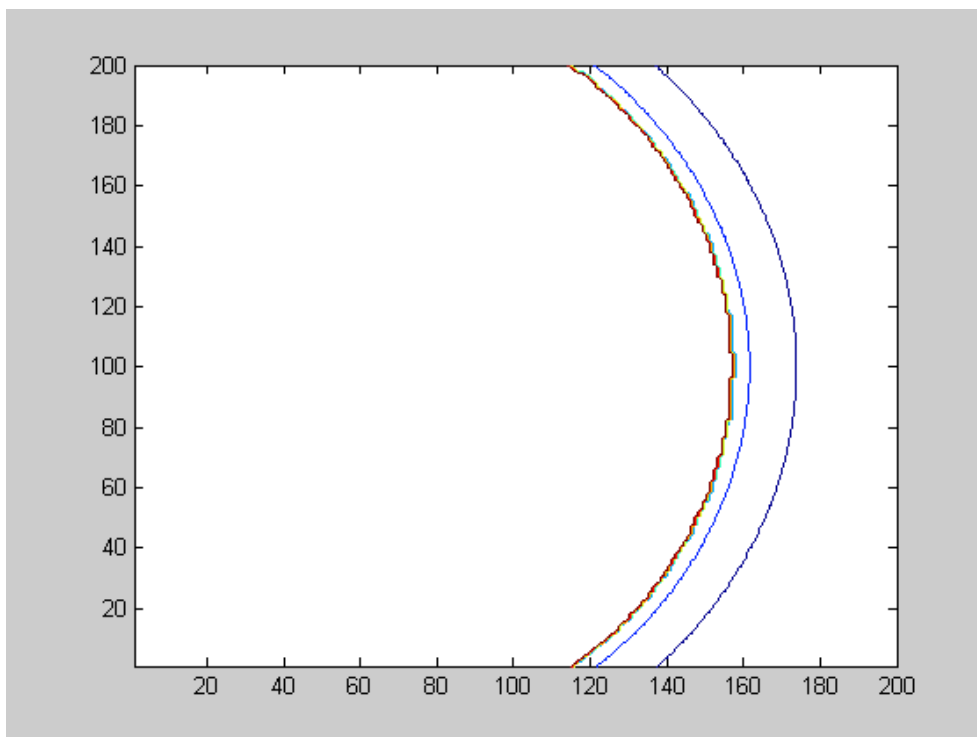
Flamlängd: 0.3 m; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



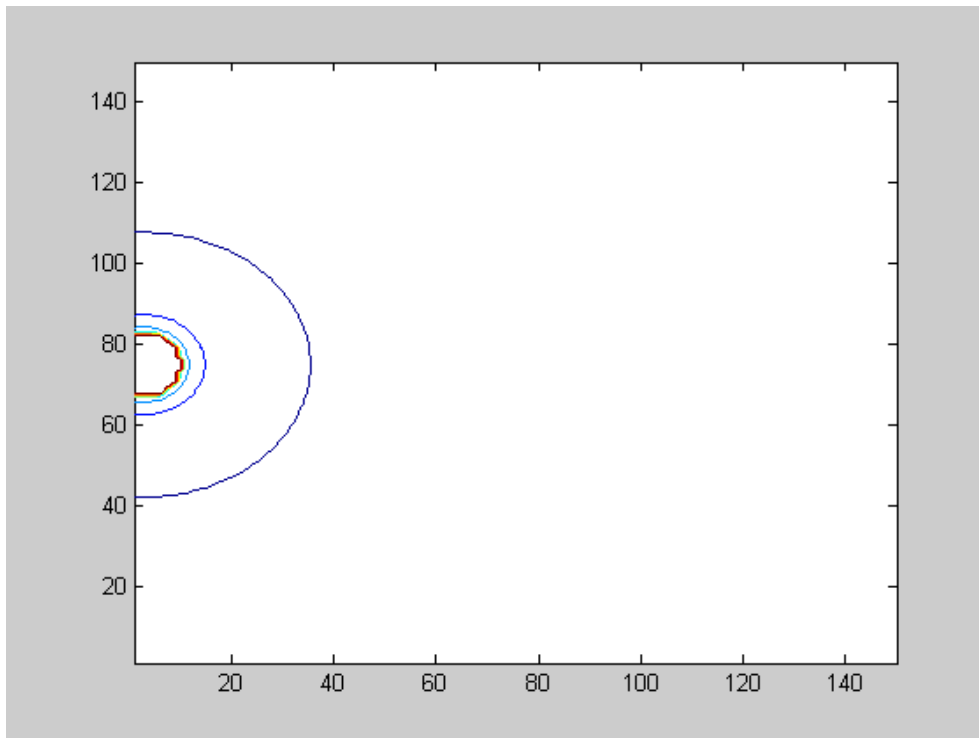
Flamlängd: 0.3 m; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).



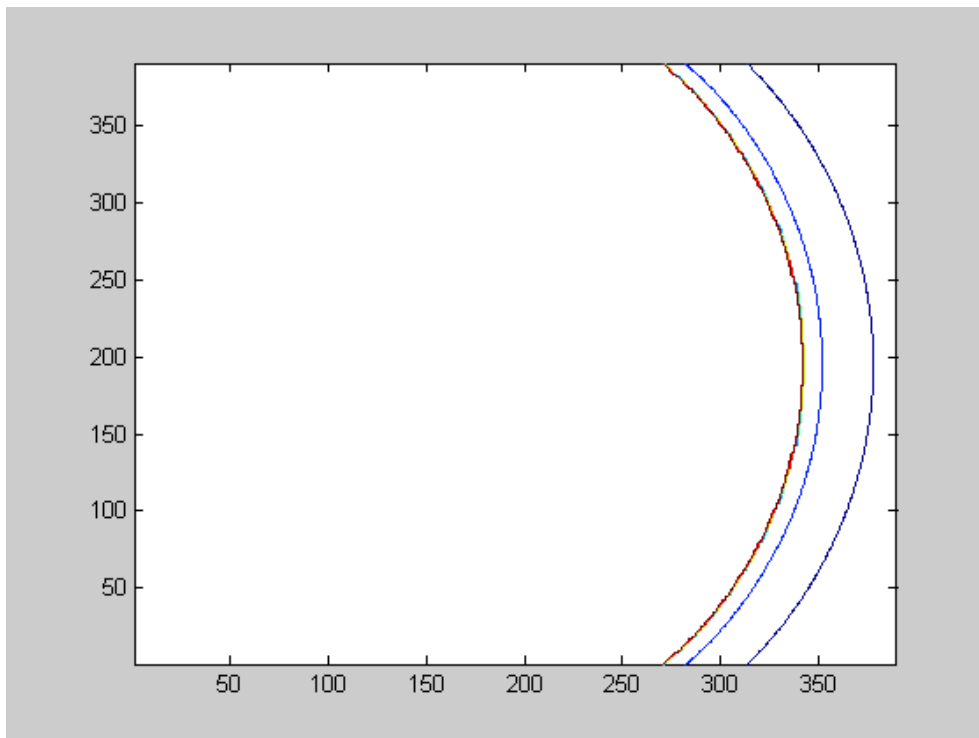
Flamlängd: 0.6 m; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



Flamlängd: 0.6 m; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).



Flamlängd: 0.9 m; t: 60 sekunder (längdskala: 0.1 m).



Flamlängd: 0.9 m; t: 120 sekunder (längdskala: 0.1 m).