

STUDIE

Spridningsmodeller för brand i vegetation

Test av modeller lämpliga för svenska förhållanden



Faktaruta

Kartläggning av spridningsmodeller för brand i vegetation

2015-2016

Författare:

Jan Burman, Anders Granström*, Inka Bohlin*, Per-Åke Gradmark, Christian Lejon.

FOI, SLU*

Detta uppdrag har genomförts som ett samarbete mellan FOI, med kompetens inom fysikaliska modeller och specifikt spridningsmodellering samt SLU med kompetens inom skog, skogsbrand och GIS. FOI tillsammans med SLU har inventerat och sammanställt grundfakta om ett antal brandspridningsmodeller som presenteras i rapporten och i ett separat dokument (Bilaga 2). Efter en bedömning av egenskaper har tre modeller använts för att simulera skogsbranden vid Sala 2014. Modellerna kräver en heltäckande bränsleklassning och det är klassningen av bränslet som kräver mest utveckling och bearbetning för att modellerna ska kunna simulera förloppet väl. Modellerna i sin tur kräver också att operatörerna är tränade och kunniga inom området skogsbrand.

MSB:s kontaktperson:

Gunnar Vestin, 010-240 51 58

Foto: Anders Granström, SLU

Publikationsnummer MSB1037 - december 2016

ISBN 978-91-7383-692-0

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna studierapport. Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

Förord

FOI har tillsammans med SLU på uppdrag av MSB genomfört en studie med målsättningen att sammanställa ett dokument med brandspridningsmodeller där man kan jämföra deras egenskaper. Dessutom har ett antal modeller applicerats på data, samlad vid skogsbranden vid Sala 2014.

Arbetet har sammanställts i innevarande rapport tillsammans med ett fristående dokument, benämnt Bilaga 2, utfört med Microsoft Excel där information om drygt ett 20-tal brandspridningsmodeller återfinns.

Innehållsförteckning

1. Bakgrund	7
2. Nomenklatur.....	9
3. Metodik.....	11
4. Introduktion	12
4.1 In- och utparametrar	12
4.2 Modellkategorier.....	13
4.2.1 Fysikaliska modeller	13
4.2.2 Semi-empiriska modeller.....	14
4.2.3 Statistiska modeller.....	14
5. Översikt av befintliga brandspridningsmodeller	15
5.1 Vilka krav bör ställas på en spridningsmodell för svenska förhållanden.....	15
5.1.1 Simuleringsteknik	16
5.1.2 Bränslemodeller	17
5.2 Icke-spatiala modeller.....	18
5.3 Ett urval spatiala modeller	19
5.4 Brandspridningsmodeller, sammanfattning	21
6. Test av tre brandspridningsmodeller i en svensk kontext	22
6.1 Testområde	22
6.1.1 Väderdata.....	22
6.1.2 Spridningsobservationer.....	22
6.1.3 Redan existerande dataset.....	24
6.1.4 Nya dataset för brandspridningsmodelleringen.....	25
6.1.5 Data för Prometheus	28
6.1.6 Data för Farsite.....	28

6.1.7 Data för Wildfire Analyst	28
7. Resultat	31
7.1 Prometheus	31
7.2 FARSITE	37
7.3 WildFire Analyst	40
7.4 Jämförelse mellan olika program	44
7.5 Vad behövs för att implementera en brandspridningsmodell i nationell skala?	47
8. Referenser	48
Bilaga 1	50
Bilaga 2	52

Sammanfattning

Syftet med studien är att inhämta underlag för att kunna höja beslutsförmågan vid vegetationsbrand genom att kartlägga om någon befintlig modell eller sådant system som ger prognoser om brandbeteendet kan implementeras i Sverige eller om utvecklingsbehov finns för en sådan. Studien ska ge en fördjupad kunskap om befintliga modeller, och sätta dem i relation till de data som samlats in från branden i Västmanland och tidigare bränder.

Ett drygt tjugotal brandspridningsmodeller har identifierats och utvärderats utifrån ett antal kriterier för att tydliggöra deras förmågor och brister. En sammanställning av denna information finns i Bilaga 2.

Brandbeteendemodeller kan delas upp i tre kategorier: Fysikaliska, semi-empiriska och statistiska. Var och en av kategorierna har sina egna för- och nackdelar, och man kan inte utan vidare säga att den ena är bättre än den andra, det beror helt på användningsområdet.

Ur den sammanställda gruppen brandspridningsmodeller har tre modeller valts ut att utvärderas mot information insamlad i samband med skogsbranden vid Sala 2014.

Modellerna FARSITE, Prometheus och Wildfire Analyst har använts för att återskapa brandförloppet under den första branddagen. Resultaten visar att det krävs en hel del anpassning av bränsleklasser för att uppnå resultat som liknar det förlopp som har observerats. Dessutom krävs god kunskap av operatören om både modellegenskaper och hur brand i vegetation uppför sig.

Beräkningsmässigt har alla dessa modeller svårt att beräkna brandutveckling över mer än ett dygn i taget. Av dessa tre visar sig vid denna jämförelse att Prometheus ger bäst resultat. Däremot betyder det inte att de andra modellerna skulle ge sämre resultat om bränsleklassificering och andra datagrupper blir anpassade för respektive modell.

1. Bakgrund

Bränder i vegetation uppvisar en enorm spännvidd i beteende vad gäller spridningshastighet, intensitet, rökspridning etc. och alla dessa variabler är också centrala för möjligheten till bekämpning. Det har därför sedan decennier gjorts mer eller mindre sofistikerade system för att prognosticera brandförlopp och simulera hur bränder styrs i en komplicerad omgivning av varierande bränsle, topografi, bränslefukthalt och vind. Framsteg inom bland annat GIS har gjort det möjligt att idag spatialt modellera bränder i terrängen i realtid och ett stort antal system för detta har utvecklats i skilda delar av världen.

Mot bakgrund av den stora skogsbranden i Västmanland sommaren 2014 kan vi konstatera att det även i Sverige finns ett behov av beslutsstöd som kan användas för att prognosticera brandbeteende vid en vegetationsbrand. Sverige har för närvarande inga egna modeller eller metoder för att förutse bränders intensitet och spridningshastighet.

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. Verktyg som stöder beslutsfattandet vid en vegetationsbrand kommer att vara mycket efterfrågade i framtiden.

Under slutet av 1990-talet introducerades nya "brandriskmodeller" för brand i vegetation i Sverige. Tre modeller (HBV-modellen, FWI-modellen och gräsbrandsmodellen) infördes och ger prognoser om förutsättningar för brandspridning utifrån meteorologiska variabler. Även om modellerna idag benämns som "riskmodeller" kan dessa beräkningar inte modellera eldens utbredning i terrängen och inte heller de konsekvenser som en brand kan medföra.

När beslut togs om att införa FWI-modellen i slutet av 1990-talet var ett argument att det senare också skulle tas fram verktyg för brandspridning och att läromedel m.m. skulle produceras av dåvarande Räddningsverket. Resursbrist ledde dock till att endast en grundläggande lärobok om skogsbrandsläckning färdigställdes 2003, (Hansen 2003). I denna lärobok beskrivs möjligheten att använda brandspridningsmodeller endast översiktligt. Läromedel eller verktyg för brandspridning i vegetation har därefter inte tagits fram till slutanvändare.

En förstudie för modellering av vegetationsbränder publicerades 2010 av MSB (Hansen, 2010). Förstudien syftade till att dels redovisa vad som har gjorts inom området modellering av vegetationsbränder under tidigare år, dels att ge rekommendationer om det fortsatta arbetet med att utveckla en svensk modell för vegetationsbränder. Förstudien rekommenderade att en semi-empirisk

modell används/utvecklas i Sverige. Trots de problem som finns med begränsad precision, gör modellernas snabbhet och enkelhet dem användbara för operativ användning.

Även om en modell för vegetationsbränder kan vara mycket sofistikerad kommer den att vara kraftigt beroende av kvaliteten på indata. MSB har genomfört en förstudie kring möjligheten att klassificera vegetationen från bränslesynpunkt för att använda i brandspridningsmodeller. Förstudien var färdig 2015¹ och ytterligare arbete i denna riktning pågår.

Modeller som simulerar brandspridning tjänar flera olika syften. De kan förenkla för beslutsfattare att analysera, bedöma och planera för sådana händelser, för att därigenom identifiera åtgärder som krävs för att hantera kommande händelser på ett effektivt sätt. I förebyggande syfte kan de användas för att öka beredskapen i ett visst område och förutsäga risker om vegetationsbrand uppstår, och exempelvis identifiera områden där bränder med hög intensitet kan uppstå. I ett internationellt perspektiv är dock det huvudsakliga användningsområdet för brandspridningsmodeller insatsplanering vid pågående brand. Spridningsprognoser kan då användas för att avgöra vart resurserna ska skickas, om ytterligare resurser bör kallas in, bedöma var brandfronten kommer att vara vid en viss tidpunkt, uppskatta vegetationsbrandens intensitet vid en viss tidpunkt etc. Ett ytterligare användningsområde är vid utbildning och träning av brandpersonal, där olika brandscenarier kan simuleras.

Syftet med innevarande studie är att inhämta underlag för att kunna höja beslutsförmågan vid vegetationsbrand genom att kartlägga om någon befintlig modell eller sådant system som ger prognoser om brandbeteendet kan implementeras i Sverige eller om utvecklingsbehov finns för en sådan. Studien ska ge en fördjupad kunskap om befintliga modeller, och sätta dem i relation till de data som samlats in från branden i Västmanland och tidigare bränder.

Målet är att MSB ska få ett underlag för val av modell eller system som kan användas som ett beslutsstöd avseende brandbeteendet i vegetation under svenska förhållanden. Modellen ska kunna användas på såväl lokal, regional som nationell nivå. Modellen ska också kunna användas före en brand som riskanalysverktyg, under en insats och/eller som analysverktyg efter en brand.

¹ Bränsleklassificering för vegetationsbränder Slutsatser och rekommendationer. https://www.msb.se/Upload/Forebyggande/Naturolyckor_klimat/nationell_plattform/Br%C3%A4nsleklassificering%20of%C3%B6r%20vegetationsbr%C3%A4nder.pdf, METRIA.

2. Nomenklatur

ARCGis/ArcView	Två olika datorprogram för att hantera GIS-data, utvecklade av ESRI
Corine	Ett satellitbaserat EU-finansierat system för heltäckande klassning av vegetation
DEM	Digital Elevation Model. Digital modell för markhöjd
ESRI	Mjukvaruföretag, leverantör av GIS-programvara. "the Environmental Systems Research Institute"
FBP	Det kanadensiska <i>Forest Fire Behavior Prediction</i> -systemet
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
FWI	Ett kanadensiskt skogsbrandindex som skalar till brandintensitet (Fire Weather Index). "FWI-systemet" används ofta som beteckning för hela det kanadensiska brandrisksystemet, som dock innehåller flera andra index
GIS	Geografiskt informationssystem
ha	hektar (100 x 100 m ²)
HBV	Vattenbalansmodell för beräkning av markens vattenhalt och avrinning (förkortning av "Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning")
kNN-Sverige	En heltäckande skogskarta med uppgifter om trädhöjd etc, baserad på satellitdata och riksskogstaxeringens fältdata. Heter idag "SLU Skogskarta"
MESAN	En metod SMHI använder för att approximera uppmätt väderinformation till lokal nivå (exempelvis rutor med dimensionen 11x11 km ² som för närvarande används för brandriskberäkningarna).

MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
Operativ modell	Här definierad som; En modell med tillräcklig färdighetsnivå och beräkningsnabbhet för att användas under pågående släckningsinsats. Beräkningstid upp till timmar.
rh	relativ luftfuktighet
SLU	Sveriges lantbruksuniversitet
Web of Science	Databas som medger sökning av artiklar från världens alla vetenskapliga tidskrifter

3. Metodik

I uppdraget från MSB ingick att göra en grov kartläggning av förekommande brandsimulatorer, för att sedan landa i en presentation av system eller modeller som kan lämpa sig för svenska förhållanden. Kartläggningen har baserats på litteratursökning i databaser för vetenskapliga artiklar (exempelvis Web of Science) samt sökningar på allmänt tillgängliga nätsidor.

I uppdraget ingick vidare att testa ett par modeller mot en reell väldokumenterad händelse. Efter bedömning av ett antal potentiella bränder föll valet av testområde på branden i Västmanland 2014, här kallad ”Salabranden”. Resultatet av arbetet presenterades i Karlstad i september 2016 inför en av MSB utvald referensgrupp.

4. Introduktion

De enklaste systemen för beslutsstöd beträffande vegetationsbränder är av typen brandrisksystem. Syftet är då att ge en uppskattning av förutsättningarna för uppkomst av brand, så att man kan anpassa graden av beredskap och insatsförmåga – till exempel gällande fördelningen av brandbekämpningsresurser eller utfärdande av varningar till allmänheten. I en utvecklad form kan dessa även ge en grov spridningsprediktion. Applicerat på en bränslemodell kan man då få en skattning av brandens intensitet och spridningshastighet med och mot vinden. Sådana modeller som använder sig av lokala data kan betecknas som "Icke Spatiala".

För att få en heltäckande spridningsprediktion i terrängen krävs spatial beskrivning av bränslet, topografin samt en simuleringsmodell som kan använda sig av rumsligt varierande information. De dominerande är cellulära automater och vektorutbredningstyper. I de cellulära automaterna indelas markytan i celler, vilka befinner sig i ett av tre tillstånd: obrända, brinnande eller brända. De obrända grannarna till en brinnande cell antänds efter en tid styrd av vind och bränsleklass, vilket ger upphov till brandens temporala och spatiala utbredning. De vektordrivna simuleringsmodellerna utgår i stället från Huygens vågutbredningsprincip. Det innebär att man för varje punkt längs brandperiferin beräknar en spridningshastighet som i kombination med en tidskonstant ger upphov till en ny utvidgad brandperiferi. Den underliggande formfaktorn för utvidgningen är vanligen elliptisk. En vidareutveckling av vektorsimuleringsmodellen är MTT, kort för *Minimal Time Travel*. Där läggs ett raster av noder över kartan, och brandfrontens utbredning blir resultat av en algoritm som beräknar snabbaste spridningsvägen mellan närliggande noder. Fördelen med detta blir att man i processorer med flera kärnor kan utföra parallella beräkningar, då beräkningsmetoden är mer explicit, vilket ger minskade beräkningstider. Modeller som använder sig av rumsligt varierande information kan betecknas som "Spatiala".

4.1 In- och utparametrar

Viktiga indata för brandsimulering är alltså en ytmässigt heltäckande beskrivning av bränslet och topografin, men också av bränslets fukthalt samt aktuell vindstyrka. Det behövs därför spatialt och temporalt högupplösta väderdata och en bra modell för beräkning av bränslefukthalt i olika bränsleskikt. Viktiga vädervariabler för fuktberäkningen är alltid nederbörd, vindstyrka, temperatur och luftfuktighet, men i vissa system ingår även solinstrålning. Träffsäkerheten i en brandsimulering kommer givetvis att vara starkt beroende på kvaliteten i dessa indata, oavsett själva modellens precision.

Viktiga utdata är främst en yttäckande beskrivning av brandområdets utbredning över tiden, men också skattning av brandintensiteten. Ett kvantitativt mått på brandfrontens intensitet är till mycket stor hjälp som

operativt beslutsstöd, till exempel vid dimensionering av brandgator. Ur brandintensiteten kan man dessutom få en god uppskattning av flammhöjden, som har stor betydelse för övergången från mark- till kronbränder. Rökutveckling är en annan användbar utparameter, till exempel i operativa sammanhang där man använder sig av vattenbombning från helikopter som bekämpningsåtgärd.

4.2 Modellkategorier

Brandbeteendemodeller kan delas upp i tre kategorier: Fysikaliska, semi-empiriska och statistiska. De fysikaliska modellerna grundar sig på etablerade matematiska beskrivningar av kemiska och fysikaliska processer som rör brandbeteende – antändning, värmeöverföring, bränslekonsumtion, interaktion mellan flamma och atmosfär, och liknande. I de semi-empiriska modellerna utgår man från förenklade samband och korrelerar detta mot testbränder, medan de statistiska modellerna är just statistiska i sina beskrivningar av verkliga bränder utan ansats att inkludera fysikaliska mekanismer. Var och en av kategorierna har sina egna för- och nackdelar, och man kan inte utan vidare säga att den ena är bättre än den andra, det beror helt på användningsområdet.

4.2.1 Fysikaliska modeller

En av de stora fördelarna med fysikaliska modeller är deras förmåga till skalning. Eftersom de bygger på kända samband kan man vid validering mot testbränder använda betydligt mindre datamängder jämfört med för de andra modellkategorierna. En annan fördel är potentialen att bättre fånga det icke-linjära beteende som kan uppträda vid högintensiva bränder, då fukt- och värmetransporten från branden ger en påverkan på bland annat vindar och luftombyten.

Brand är emellertid ett väldigt komplext fenomen och det finns fortfarande luckor i kunskapsfältet, inte minst vid beskrivningen av de kemiska förbränningsprocesserna och eldens interaktion med atmosfären. Det är därmed i dagsläget inte möjligt för någon fysikalisk modell att helt fullständigt beskriva en brandsituation. Vidare använder sig de flesta modellerna endast av temperaturberoende strålning som mekanism för värmeöverföring, och kan därför bara ge tillförlitliga utdata för bränder där just strålningsvärme är den dominerande värmeöverföringsprincipen, vilket inte alltid är fallet.

Fysikaliska modeller kräver validering för den miljö de ska användas i, och detta försvåras av att några av de viktigaste inparametrarna, bland annat flammhöjd och rökgasviskositet, är mycket svåra att mäta i fält. I praktiken blir därför fysikaliska modeller mest av intresse i laborativa sammanhang. För operativ verksamhet är de däremot svårare använda, och därtill kommer att de ställer höga krav på datorkraft, användarkunskap och långa beräkningstider. Få realtidssimulatorer finns, och dessa har en beräkningstid i storleksordningen timmar för en halvdagsprediktion.

4.2.2 Semi-empiriska modeller

De semi-empiriska (eller semi-fysikaliska) modellerna utgår från förenklade fysikaliska samband, där sedan statistik från provbränder efter dimensionsanalys gett värdet på konstanter i beräkningsformlerna. Den viktigaste och mest använda modellen i denna kategori är en spridningsmodell för markbränder utvecklad av Rothermel (1972). Den utgår från värmetransport genom strålning och från energins bevarande, där spridning sker som en serie av antändningar från en bränslemängd till en annan. Spridningsalgoritmen utgår från enhetliga bränsleförhållanden, lutning och vind, och har efter validering visat godtagbara resultat. Andra semi-empiriska modeller är Rothermels kronbrandsmodell (1991) och mark- och kronbrandmodellerna av Van Wagner (1977). Ofta kombineras flera brandbeteendemodeller för att bättre simulera brandtillväxt. Exempel på delmodeller kan vara övergång från mark- till kronbrand eller uppskattning av avstånd där flygbränder kan uppstå.

4.2.3 Statistiska modeller

Statistiska (eller empiriska) modeller gör inga ansatser att involvera fysikaliska principer utan är statistiska beskrivningar av data från ett stort antal studerade bränder. Detta gör att de endast med försiktighet kan användas utanför de förutsättningar som legat till grund för deras utveckling. Inom de förutsättningarna har de emellertid visat sig ge goda resultat. De två stora modellerna i denna kategori är McArthurs modell för gräsbränder, som används i Australien, och det kanadensiska *Forest Fire Behavior Prediction*-systemet (FBP). Dessa grundar sig på statistik från 5500 respektive 400 bränder, där merparten utgörs av naturliga vegetationsbränder.

5. Översikt av befintliga brandspridningsmodeller

Ett drygt 20-tal simulatorer eller beräkningsmodeller för brandspridning har sammanställts och presenteras i Bilaga 2. Merparten använder sig av Rothermels spridningsmodell för ytbränder. De av simulatorerna som har högre grad av måluppfyllelse presenteras närmare nedan. Med måluppfyllelse menas här en sammanvägd gradering av anpassningsbarhet, användarvänlighet och prestanda. För översikt av modellerna hänvisas till Bilaga 2. Där återfinns också kriterier som speciellt eftersökts när information om beräkningsmodellerna har sammanställts, (för kriterier; se även Bilaga 1).

Eftersom många modeller använder sig av samma grundprinciper och enbart skiljer sig åt i implementationen och möjligen grafisk presentation, har dessa grundprinciper presenterats i kapitlet 5.1.1 Simuleringsteknik.

5.1 Vilka krav bör ställas på en spridningsmodell för svenska förhållanden

Vid ett uppstartsmöte skissades kriterier upp för kravställan på en applicerbar brandspridningsmodell. Under arbetets gång har dessa modifierats något, men det bakomliggande syftet att förtydliga vad modellerna har för egenskaper, har bibehållits. Önskvärt var att modellerna ska kunna fungera före, under och efter en händelse eller alternativt under någon av dessa sekvenser. Före, representerar ett planeringsläge där riskbedömningar görs och insatser prövas och planeras. Under en händelse som stöd för aktiviteter och efter en händelse, för ökad förståelse för händelseförloppet och att undersöka alternativa åtgärder. Systemets förmåga att presentera information är därmed också av betydelse.

Ett av önskemålen var att systemet skulle vara anpassat för operativt bruk, dvs. kunna användas som beslutsstöd för räddningstjänst under pågående incident. Implicit blir detta också ett krav på beräkningstider långt under realtid, vilket i praktiken utesluter de beräkningstunga fysikaliska modellerna. För före- och efterfasen har beräkningstiden mindre betydelse men kan påverka möjligheten att pröva flera alternativa lösningar under en övning. Före- och efterfasen kan kallas analytisk och betecknas så i Bilaga 2. Även modeller med höga krav på användarkunskap och beräkningskraft hör till denna grupp av modeller. Dessa är att betrakta som forskningsverktyg och används ofta för att studera speciella förlopp som i ett senare skede kan förenklas och införas i andra modeller.

Vissa önskemål om funktionalitet ställdes också, såsom stöd för GIS, tidsvarierande väder, förmåga att hantera olika bränsleklasser, beräkna flamlängd och strålningsintensitet, med mera.

Utgångspunkten vid utvärdering av möjliga brandsimulatorer för svenskt bruk var att det ska vara system eller modeller som kan implementeras i Sverige. I värderingen ingår också att klarlägga om utvecklingsbehov finns. Systemet bör vara transparent i sin uppbyggnad, dvs. de underliggande brandbeteendemodellerna ska finnas väl dokumenterade. Systemet ska vidare ha så mycket av den krävda funktionaliteten som möjligt, utan att detta sker på bekostnad av användarvänlighet. Hög precision i brandprognoserna, liksom hög valideringsgrad av de ingående brandbeteendemodellerna var också önskvärt.

De specifika kriterierna återfinns i Bilaga 1 i detta dokument och i Bilaga 2, och är formulerade så att det ska bli möjligt att jämföra modellerna. Den information som återfinns i Bilaga 2 om de olika modellerna tjänar till att ge en uppskattning om fördelar och nackdelar samt grundprinciperna för modellerna. Dessutom visas vilka förmågor modellerna har. Alla modeller är inte så väl dokumenterade att alla kriterier har låtit sig beskrivas, så i vissa fall har dessa kriterier lämnats obesvarade. I samtliga fall finns det referenser och artiklar som gör modellerna spårbara om de visar sig ha egenskaper som kan vara av intresse.

I tillägg till kriterielistan har bedömningsparametrar lagts till med rubriken Måluppfyllelse. Här har författarna gjort sin expertbedömning av modellerna för att ge en integrerad bild av modellegenskaperna. Dessa punkter ska ses som bedömningsstöd och är bara indirekt kopplat till respektive modells egenskaper.

5.1.1 Simuleringsteknik

Cellulär automation är den kanske mest beräkningseffektiva simuleringstekniken, något som möjliggör bl.a. probabilistiska prediktioner. De är dessutom väl anpassade till heterogena bränslebäddar. Ett fundamentalt problem hos de cellulära simuleringmodellerna är emellertid distorsion av brandperimetern; Eftersom brandriktningen på lokal nivå begränsas till de närmsta cellgrannarna medges bara lokal spridning i ett begränsat antal riktningar. Genom att inkludera ett större antal av de närliggande cellerna eller variera cellformen kan man minska denna inverkan, men i realiteten kvarstår problematiken.

Den simuleringsteknik som brukar anses bäst på att beskriva spridning av brand är *vektorburen vågutbredning* genom Huygens princip (bl.a. French 1990 och French 1992), och det är också den tekniken som används i de två mest spridda modellerna; FARSITE och Prometheus. Vid utvärderingsstudier av olika simulatorers precision i prediktionen, där de simulerade brandförloppen jämförts med data från verkliga vegetationsbränder, framställs ofta just dessa två som de som bäst efterliknar verkligheten (t.ex. Opperman et al 2006).

En svårighet med vågutbredningssimulering är dock om tidssteget blir alltför stort i situationer med heterogena bränsleförhållanden. Brandfronten riskerar då att spridas in i ett fält med ny bränsleklass med en hastighet grundad på

parametrar från den föregående bränsleklassen. För att komma förbi detta måste tidstegets storlek (med den perimeterutvidgning den medför) hållas mindre än de karterade bränslefältens storlek.

En generell modell som baseras på en beskrivning av enskilda *fysikaliska och kemikaliska processer* tenderar att bli komplex. Därmed också beräkningskrävande. Med tanke på att de skalor som en vegetationsbrand verkar på sträcker sig från millimeter till flera kilometer, kan antalet beräkningspunkter bli 10^{15} eller mer. Fördelen med denna typ av komplexa modeller är att det medför möjlighet att förbättra de förenklade modeller som kan lämpa sig för studier och beredskapssystem. Denna typ av hierarkisk ordning av modeller där en komplex modell kan fungera som ställföreträdande verklighet vid modellutveckling är en standardiserad metod för modellutveckling. Observera att även de komplexa modellerna måste valideras mot verkligheten.

För denna typ av modeller gäller att de ställer stora krav på användaren både för hanterandet av beräkningsprogramvara, datorhantering, fysikalisk modellering och även kunskap om vegetationsbränder. Vid implementationen som beredskapsmodell krävs därför att en stor del av hanteringen automatiseras och samtidigt förenklas så att automatisering är möjlig.

WFDS och även FIRETEC har börjat användas vid planering av avsiktliga bränningar. Dessutom har WRF-SFire implementerats som brandsimulator i den israeliska prognosmodellen Matash.

5.1.2 Bränslemodeller

Bränslet är en av de mest kritiska komponenterna för uppkomst och spridning av brand. Hur bränslesammansättningen ser ut, samt vilken fukthalt den har, kommer att avgöra lättantändligheten samt hur brandförloppet utvecklar sig. Eftersom bränslet är en produkt av växtsamhället, som i sin tur definieras av klimatet, har liknande klimatzoner likartad bränslesammansättning och brandkaraktäristik (Granström 2009). De bränslemodeller som utvecklats har därför alltid en inneboende anpassning till ett visst biom. Precisionen i brandspridningsprognosen kommer därför att vara avhängig hur väl bränslemodellen beskriver vegetationen där den appliceras.

FARSITE, och andra system som bygger på Rothermels brandbeteendemodeller, utgår från en bränslemodell framtagen för att representera vegetationen i USA. Där har man i de mest brandbenägna delarna i väster liknande klimat som i de södra medelhavsländerna, dvs. med regniga vintrar och långvarig sommartorka. Det ger en potent kombination av hög biomassa och hög potentiell spridningshastighet. De 40 inbyggda klasserna är anpassade för just den terrängen, med tonvikt på gräs- och buskvegetation.

Bränslemodellen i Prometheus grundar sig på det kanadensiska FBP. De 18 bränsleklasserna som ingår representerar i huvudsak barr- och blandskog för att beskriva vegetationen i det boreala barrskogsområde där Kanada ingår. Lavar, mossor och barrträd är gynnsamma bränslen, som bara kräver några dagars torka för att bli brännbara. Sverige ligger till allra största delen i denna

region, och vår vegetationssammansättning och bränslestruktur är därför redan ganska väl anpassad till FBP. Brandrisksystemet FWI, som ju i grund och botten är en bränslefuktmodell, ingår dessutom i FBP då några av dess utparametrar används i bränslemodellen för att uppskatta bland annat initial spridningshastighet.

I många system ges möjlighet att addera egna klasser till bränslemodellen, samt att göra vissa parameterjusteringar på befintliga klasser för att anpassa simuleringsbeteendet för en närbesläktad bränsletyp. Det kan handla om bränsledensitet, kronhöjd, krontäckningsgrad och liknande. Hur effektivt denna anpassning låter sig göras beror emellertid på bränslemodellens uppbyggnad. I en bränslemodell med huvudinriktning mot gräs är uppsättningen parametrar vald för att bäst representera just varianter av grästyper, och motsvarande gäller för en barrskogsmodell. En simulator som Phoenix Rapidfire som fungerar utmärkt för australiensiska gräsbränder skulle av den anledningen kräva mycket omfattande arbete för att anpassas till svenska förhållanden, då man skulle behöva skapa många nya bränsleklasser helt från grunden.

5.2 Icke-spatiala modeller

Det finns enkla program som beräknar viktiga brandbeteende-variabler för en viss uppsättning ingångsvariabler, utan att modellera eldens successiva utbredning över terrängen med dess kontinuerligt varierande topografi och bränsle. Hit hör BEHAVE-systemet, som utvecklats av USA:s Forest service. Med input av bränsletyp, vindstyrka och markens lutning beräknar modellen spridningshastighet och flamlängd i eldens huvud, rygg och flank samt även ett antal sekundära variabler som tillryggalagd sträcka efter olika tider, brandområdets omkrets m.m. Hjärtat i systemet är Rothermels (1972) brandspridningsmodell, dvs. samma som ingår i många av de mer sofistikerade spridningsmodellerna (se nedan). BEHAVE är fritt tillgängligt och har en omfattande dokumentation som kan hämtas på nätet. Bränsletyperna är de standardiserade 40 typer som USAs nationella bränslekartering använder, men man kan också definiera egna utifrån bränslebäddens struktur.

RedApp är ett likartat system som bygger på ”Canadian Fire behaviour Prediction System”. Input är bränsletyp, marklutning, vindstyrka och vindriktning i relation till marklutningen, samt värden för två index i FWI-systemet (BUI och FFMC). Bränsletyperna är 18 till antalet och täcker skilda typer av skog samt gräsmarker. Programmet beräknar spridningshastighet och intensitet i huvud, flank och rygg samt area och brandområdets omkrets efter olika tid från antändning. Programmet utgår då från att brandområdet har en elliptisk form. De underliggande algoritmerna för spridningshastighet etc. är desamma som i Prometheus (se nedan), men programmet har ingen GIS-komponent och kan bara hantera en uppsättning variabler åt gången. Programmet är fritt tillgängligt.

5.3 Ett urval spatiala modeller

Utifrån bedömningen av Måluppfyllelse i Bilaga 2 har de med högre poäng valts ut för presentation här. Information om övriga modeller återfinns i Bilaga 2.

FARSITE (Finney 2004) har en utbredd användning hos brandförsvarsorganisationer i USA som operativt stöd vid vegetationsbränder. Det är en brandspridningssimulator baserad på en samling av brandbeteendemodeller (BEHAVE), som i sin tur bygger i huvudsak på Rothermels spridningsmodell (1972). Simulatorens inkluderar brandbeteendemodeller för bränslefukthalt, flygbrand, bränslekonsumtion, kronbrands-initiering och kronbrands-spridning. Den licensfria mjukvaran är PC-baserad i Microsoft Windows och använder ArcView GIS för att beskriva spatiala bränsledata och topografi. Även källkod är fritt tillgänglig. Det finns 40 olika bränsleklasser, med tonvikt på vegetation av gräs- och busktyp. Simulering av brandområdets tillväxt sker genom elliptisk vågutbredning enligt Huygens princip.

Prometheus (Tymstra et al 2010) baseras på det kanadensiska brandbeteendesystemet FBP och är alltså statistisk till sin natur. Liksom i FARSITE används deterministiska vågutbredningsalgoritmer för att simulera eldens spridning. Systemet används i Kanada på nationell nivå genom det myndighetsövergripande centret för skogsbrand – CIFFC. Prometheus är licensfri och Windows-baserad, använder kartor och geografiska data exporterade från tredjeparts GIS-plattformar, och är avsett att användas som ett realtidsbeslutsstöd för operativa insatser. Utdata är bland annat brandintensitet, spridningshastighet och bränslekonsumtion. Bränslemodellen innehåller 18 klasser, med tonvikt på barr- och blandskog.

Portugisiska **FireStation** (Lopes et al 2002) grundar sig på Rothermels brandbeteendemodeller (BEHAVE). Landytan indelas i uniforma celler och spridningssimuleringen sker från en brinnande cell till de åtta angränsande och ytterligare åtta närliggande celler enligt en MTT-liknande algoritm. Systemet är ursprungligen avsett att användas som beslutsstöd vid småskaliga bränder. Det kräver GIS och använder vindmodeller för att generera rasterad vind. Som utdata ges – förutom kartor av bland annat spridningshastighet, intensitet, flamhöjd och brandperimeter – även vindfält samt kartering av beräknat brandriskindex. Det är oklart om källkod är tillgänglig.

Wildfire Analyst är en relativt nyutvecklad mjukvara, som utgår från Rothermels brandbeteendemodeller (BEHAVE). Den är avsedd för operativt bruk, med Sydeuropa som ursprunglig målgrupp, men används även i anpassad variant i delar av USA. Simulatorens är Windowsbaserad, kräver ArcGIS och har stöd för WindNinja för generering av spatialt varierande vindfält. Systemet är tillgängligt via licenser men pris förhandlas med företaget.

Phoenix Rapidfire, tidigare SiroFire, baseras på McArthurs statistiska brandbeteendemodell som utgår från observerad spridning för ett stort antal bränder i Australien. Simuleringstekniken är av vektortyp och mjukvaran är

utformad för operativt bruk. Systemet används av landförvaltningsmyndigheter och räddningstjänst i Australien vid de massiva gräsbränder som ofta inträffar under torrperioden. Oklart om programmet kan göras tillgängligt, som exekverbara moduler eller källkod.

GeoFogo och **ModMed Fire** är ytterligare två cellulära automater, som till skillnad från FireStation endast involverar närliggande celler. Båda simulatorerna utgår från Rothermels brandbeteendemodell, och deras respektive Windowsbaserade mjukvaror är licensfria. GeoFogo är deterministisk medan ModMed Fire är stokastisk, dvs. ett antal körningar görs med introducerade slumpvisa variationer i indata. Den slutliga simuleringen blir därefter en probabilistisk sammanvägning av de samlade utfallen. För båda modellerna gäller att information saknas om tillgänglighet. Information om utvecklarna finns i Bilaga 2.

En av de mest utvecklade komplexa modellerna är **FIRETEC** som har konstruerats av forskare vid Los Alamos National Laboratory i samverkan med USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station. Med FIRETEC i kombination med HIGRAD går det studera brandutveckling med en upplösning på meterskala på en domän upp emot en kilometer. Element som är mindre än en meter parametreras och hanteras per beräkningscell. Till exempel blir vegetation representerad som porositet vid beräkning av luftens rörelser. HIGRAD är en lufttransportmodell och FIRETEC hanterar brandsimuleringen. Oklart om källkoden är tillgänglig.

WFDS är en annan modell som används i forskningssyfte. Det är en utveckling av FDS (Fire Dynamics Simulator) som utvecklats för bränder i byggnadsstrukturer. Den ger möjlighet att bygga komplexa modellsystem men lider därför också av samma inneboende problematik med krav på beräkningskraft. Denna modell kan hämtas fritt som exekverbar modell eller som källkod.

Dessa båda modeller är inte de enda så kallade forskningsmodeller som finns tillgängliga, men representerar väl denna kategori. Båda har visat sig ha svårt att återskapa den spridningshastighet på brandfronten som återfinns vid verkliga bränder. (Alexander M.E. 2012)

En annan forskningsmodell som har börjat användas som beredskapsmodell är **WRF-SFIRE**, (Mandel, Amram et al. 2014). Med utgångspunkt i att en bra prediktion av vinden är en förutsättning för god brandspridningsmodellering kombineras WRF (Weather Research & Forecasting model) med en brandspridningsmodell, SFIRE och en kem-modul, CHEM. SFIRE baseras bl.a. på de semi-empiriska modeller som utvecklats av Rothermel och är beräkningseffektiv. CHEM är däremot beräkningskrävande och används bara då studier av kemiska processer är av vikt. WRF kan dock utan CHEM beräkna t.ex. rökgastransport. WRF-SFIRE är fritt tillgänglig, exekverbar eller som källkod.

5.4 Brandspridningsmodeller, sammanfattning

Det finns alltså ett stort antal modeller för att beskriva spridningsförlopp vid vegetationsbrand. Alltifrån enkla modeller som tar hänsyn till tillgängliga data lokalt (icke spatiala) till modeller som kombinerar en vindfältsmodell med information om hur terräng, vegetationsdata och fuktighet m.m. varierar horisontellt (spatiala). Dessa modeller är utvecklade främst för att vara ett stöd för räddningstjänst och beslutsfattare. Dessutom finns modeller som har utvecklats för att studera de processer som leder fram till en vegetationsbrand och hur den utvecklas (forskningsmodeller). Över åren visar det sig att med mer utvecklade modeller och utökad beräkningskapacitet kan så kallade forskningsmodeller ta steget från enbart forskning, till tillämpade studier. Det gäller då i första hand för planering. Till exempel vid planerade bränningar.

Brandspridningsmodeller av dessa typer (icke spatiala respektive spatiala) har sammanställts i en tabell för att lättare kunna jämföra modellernas egenskaper och företräden. I tabellen i Bilaga 2 går det utläsa enligt kriteriet Måluppfyllelse vilka modeller som har de egenskaper som bedöms viktiga för att kunna bidra till en förhöjd beslutsförmåga vid händelser av typen vegetations-/skogsbrand.

Av de undersökta modellerna framstår Prometheus som den bäst lämpade för svenska förhållanden. Detta ligger i linje med tidigare undersökningar (bl.a. Jönsson och Linåker 2010) och skulle vara en naturlig följd av införandet av brandriskindexet FWI i Sverige under 90-talet. Möjligen kan FARSITE eller kanske Wildfire Analyst också vara tänkbara kandidater, i så fall beroende på bättre funktionalitet i programvaran.

Dessa tre modeller har därför valts för genomförande av en test av användbarhet och förmåga. Resultat redovisas i kapitel 6 och 7.

6. Test av tre brandspridningsmodeller i en svensk kontext

6.1 Testområde

För att testa brandspridningsmodeller krävs data på brandspridning, bränsleförhållanden och väder från verkliga bränder; antingen experimentella testbränningar eller vilda bränder. Det finns bara ett litet antal vilda bränder i Sverige där det gjorts rimligt bra spridningsobservationer: Torsburgen 1992 (1500 ha), Vännebo 2008 (700 ha), Hassela 2008 (1000 ha), Bodträskfors 2006 (1600 ha), Sala 2014 (14000 ha). Av dessa är Sala den där det finns bäst väderdata och även bäst spridningsdata, varför vi koncentrerade oss på denna. Och främst den första dagen, där det finns bäst information kring vilka bekämpningsåtgärder som kan ha haft inverkan på brandspridningen.

6.1.1 Väderdata

Skogsbranden i Sala startade strax före 13.30 (larm till SOS 13.29) den 31 juli 2014. Väderdata har tagits från SMHI:s Mesan-modellerade väder för en gridpunkt strax NO om antändningsplatsen. För vissa datainput (Prometheus Brandriskindex) krävs dygnsvis nederbörd, T(temperatur), vind och rh(relativ luftfuktighet) kl 13, under en följd av dagar före branden. För själva brandsimuleringsperioden användes timvisa data på rh, T och vind. MSB beställde väderdata av SMHI efter skogsbranden i Västmanland 2014 och förmedlades av MSB för att användas i denna studie. Väderdata är samma som använts i rapporten: Skogsbranden i Västmanland 2014, observatörsrapport². Den enda förändringen är vindriktningen under eftermiddagen 31/7, där vi ändrade från 130 grader till 135 grader, för att få bättre passning mot observerad brandspridning i det första skedet.

6.1.2 Spridningsobservationer

Salabranden startade av ett markberedningsaggregat och larmades av maskinföraren efter att han först försökt släcka med bland annat brandsläckare han hade på maskinen. Antändningstiden är därför väl belagd och även den plats där antändningen skedde. Tre timmar efter larm gjordes en överflygning med ett brandbevakningsplan, där bisittaren tog ett antal bilder vilka möjliggör

² Underlag till referenslista för observatörsrapporten kan fås från

<https://www.msb.se/sv/Produkter--tjanster/Publikationer/Publikationer-fran-MSB/Skogsbranden-i-Vastmanland-2014-observatorsrapport/>

en ganska noggrann positionering av branden vad gäller flanker och rygg. Huvudet var dock så rökbelagt att det bara kan positioneras på ett ungefär (+/- 200 m). Elden hade då ännu inte påverkats av några släckningsinsatser i huvud eller flanker, förutom en ca 500 m sträcka från startplatsen och upp längs vänstra flanken. Dag två finns likaledes flygbilder tagna vid lunchtid som visar utbredningen rätt väl. Då hade helikopterbevattning gjorts på båda flankerna, men det är oklart hur mycket detta förmått sakta ner spridningen. Under eftermiddagen gjorde elden en genombrytning och spred sig från två etablerade huvuden ca tre km framåt i terrängen. Starten för denna spridningsperiod är dokumenterad av bilder från marken och det går också att bedöma rätt väl när i tid elden under sen eftermiddag hejdades mot ett bälte av otjänligt bränsle.

6.1.3 Redan existerande dataset

I tabell nedan ges använda dataset som redan fanns bearbetade och kunde lyftas från olika arkiv. Precisionen i dessa data beror av flera faktorer (spatial upplösning, de underliggande modellernas osäkerhet etc). Generellt är det hög precision i Laserbaserade terräng- och trädhöjdsdata medan kNN-attribut och Corine-klassifikationerna är mer osäkra.

Tabell 1. Redan existerande dataset.

Egenskaper	Typ	Beskrivning
Vägar	Vektor	Vektorer för väglinjer (linjer), (Lantmäteriet).
Bäckar	Vektor	Vektorer för bäckar och diken (linjer) (Skogsstyrelsen).
Sjöar	Vektor	Vektorer för sjöar (polygoner) (Lantmäteriet).
Kalytor	Vektor	vektorer för kalhuggna ytor före brand (polygoner) (Skogsstyrelsen). Vissa kalhuggna ytor avgränsades och adderades i efterhand till data.
Skogklädda myrar	Vektor	vektorer (polygoner) för myr med trädskikt (huvudsakligen tallmosse) (Skogsstyrelsen).
Obrända ytor	Vektor	vektorer (polygoner) för alla ytor som förblivit obrända. Dessa är huvudsakligen blöt myr med gles starrväxt. Polygonerna har tagits från ett pågående examensarbete vid SLU (Andreas Souropetsis).
Höjd över havet	Raster	Lantmäteriets DEM, baserad på laserdata. Ursprunglig cellstorlek 2 x 2 m ² .
Trädslagsfördelning	Raster	Raster som beskriver volymen för tall, gran och löv. SLU Skogskarta (tidigare kallade kNN-data från riksskogstaxeringen) vilka baseras på satellit-scener och Riksskogstaxeringens provtytor från 2010. Ursprunglig pixelstorlek 25 x 25 m ² .
Corine mark-klassning	Raster	Detta skikt är en klassning baserad på satellit-scener från 2013 och har en ursprunglig pixelstorlek av 25 x 25 m ² (Lantmäteriet).
Trädhöjd	Raster	Grundtyvägd medelhöjd i meter från Skogsstyrelsens "skogliga grunddata". Modellerade data baserade på 2011 års laserdata och Riksskogstaxeringens fältytor.
Laser data	3D "point cloud"	Normaliserat point cloud data från 2011 (SLU och Lantmäteriet).
Riksskogstaxeringen	Fältdata	Fältdata från Rikstaxtytor i närheten av brandområdet (Riksskogstaxeringen)
Flygbilder	Raster	Stereobilder tagna före och efter branden (maj/juni respektive augusti 2014).

6.1.4 Nya dataset för brandspridningsmodelleringen

Ett antal dataset (raster och vektorform) behövde nyskapas och anpassas till undersökningsområdet med cellstorlek 12.5x12.5 m². Dessa dataset framgår av tabell nedan. ArcGis-program användes för alla ytmässiga beräkningar och raster/vektor-manipulationer (klippning, rastring, sammanläggningar). Flygbilder i stereo före och efter branden användes för att avgränsa och bedöma bränsletyper, kalytor och obrända ytor.

Vad gäller bränsletyper användes i de slutliga simuleringarna med Farsite bränsletyp 1, 5 och 11, efter att först ha provat typ-kombinationen 1, 6 och 12. Bränsletyp 5 och 11 genererar snabbare spridningshastighet än 6 och 12 (allt annat lika). För båda kombinationerna sattes krontäckningen till noll för att kunna få någotsånär realistisk spridningshastighet. För WildFire Analyst använde vi båda dessa kombinationer, samt testade även klasserna 2, 5, 6 och 13.

Tabell 2. Nya dataset för brandspridningsmodelleringen

Egenskaper	Typ	Beskrivning
Marklutning	Raster	Lutning (%) beräknades från Lantmäteriets DEM.
Aspekt	Raster	Lutningsriktning (grader (360) beräknades från DEM.
Trädskiktets slutenhet	Raster	Beräknades (%) från 2011 års laserdata (andel av första-eko 1.5m ovan mark. FUSION-programmet användes för denna beräkning.
Trädskiktets utvecklingsstadium	Raster	Klassindelning i tre klasser baserad på trädhöjdsrastret och rasterade kalytor. Gjordes i huvudsak för Prometheus bränsleklassificering: - "mogen": trädhöjd > 14 m (class 1) - "ung": trädhöjd > 6 och < 14 m (class 2) - "plantskog" <6m och kalytor (class 3)
Trädslag	Raster	Fyra olika klasser. Trädslagsandelar beräknades från tall/gran/löv-volymer i kNN-datat för att passa till Prometheus bränsletyper: - Talldominerat (>70 % tall) (class 1) - Grandominerat (> 70% gran) (class 2) - Lävdominerat (>70 % löv) (class 3) - Barrblandskog (>70 % barrträd) (class 4) - Lövbarrskog (lövandel > 30 %) (class 5)
"Conprop"	Raster	Andel barrträd (%) beräknat från kNN-data för användning i Prometheus för bränsletyp 50 ("mixed con/decid forest").
fuel_load31	Raster	Bränslemängd sattes till 0.15kg/m ² för bränsletyp 31 i Prometheus ("matted grass"). Användes för trädlös myr med starr.
CBH_USA	Raster	"Crown base height", m, beräknades från laserdata med hjälp av en regressionsmodell från Andersson (2004). Negativa värden sattes till noll och skattningens säkerhet testades mot trädhöjdsrastret.

Egenskaper	Typ	Beskrivning
CBH_NFI	Raster	"Crown base height" beräknades också med en egen metod baserad på laserdata och cirka 700 fälttytor från Riksskogstaxeringen från perioden 2009-2013 i närheten av brandområdet. FUSION användes för att beräkna prediktorvariabler från laserdatat. Regressionsmodeller skapades för nedersta levande gren för 1) tall och 2) gran-dominerade och 3) övriga ytor. Prediktionen på landskapsnivå baserades på trädslagsrastret (se ovan). Negativa värden sattes till noll.
CBD_USA	Raster	"Crown bulk density" kg/m ³ , beräknades från laserdata med hjälp av regressionsmodeller i Andersson (2004). För användning i Farsite.
CFL	Raster	"Crown fuel load" kg/m ² , beräknades från sambandet mellan trädhöjd, CBH_NFI och CBD. För användning i Prometheus.
Öppenmyr-corine	Raster	Raster för Corine land use klass 72 (här klass 1). Öppen myr, dock ej "våt". Användes som bränsletyp "Grass" för Prometheus.
Våtmyr-corine	Raster	Raster för Corine land use klass 71 (här klass 1). Våt myr förutsattes vara obrännbar på grund av för gles bränsleskikt. För Prometheus bränsleklassning.
Corine-coniferforest	Raster	Raster för Corine land use klasser 44-50 (Klass 1). Barrskog och blandskog. Användes bara för att fylla i "nodata forest pixels" i den slutliga bränslekartan för Prometheus.
Fuelmap-1	Raster	Bränsletyper för Prometheus. "Svenska" bränsletyper bildades efter en bedömning av strukturell överensstämmelse med de kanadensiska typer som används i Prometheus (och även i det kanadensiska brandbeteendesystemet (CFBPS)). Flera olika dataset användes för att producera den slutliga bränslekartan (Figur 2 och 3). Alla vektorer rasterades först. Operationerna gjordes i ArcGIS. <ul style="list-style-type: none"> - C3 (class 3) = "mature conifer dominated forest (pine, spruce and conifer mixed)". Hit fördes också skogklädd myr. Baserades på trädslagsrastret, utvecklingsstadierastret och rastret för skogklädd myr. - C4 (class 4) = "young conifer dominated forest". Baserades på trädslagsrastret och utvecklingsstadierastret. - M2 (class 50) = "mature and young mixed deciduous forest and deciduous dominated forest" (bara några få pixlar påträffades i undersökningsområdet). Baserades på trädslagsrastret och utvecklingsstadierastret. - S1 (class 21) = "young seedling stands and clear cut areas". Baserades på utvecklingsstadierastret. - O1 (class 31) = Öppen myr (Corine). Baserades på "othermirescorine" raster. - Non-fuel (101) = Icke-bränsle (exempelvis sjöar, våta myrar och andra bränslefria ytor).

Egenskaper	Typ	Beskrivning
		<p>”Wetmirescorine raster” och ”UnburnedWS raster” samt alla pixlar som inte är nämnda ovan klassades som ”Non-fuel”.</p> <p>- No-data (-9999) = Saknade data bedöms som icke-bränsle i Prometheus.</p> <p>Skapandet av bränslekartan krävde flera sammanjämkande operationer och i vissa fall fanns överlappande skikt, exempelvis för öppenmyr-corine och skogklädd myr. I dessa fall fick det skikt som hade störst precision prioritet. På samma sätt fick obrända ytor prioritet som icke-bränsle. När alla bränsletyper var noterade befanns åtskilliga pixlar sakna data, på grund av bland annat att det saknades information om trädslag i kNN-datat eller att det saknades information om trädhöjd. I allmänhet bedömdes dessa pixlar vara klass 3 (C3) om de i Corine-klassningen hade satts till 44-50 (barr-dominerad eller blandskog). Annars fick de stå som No data (non-fuel)</p>
Fuelmap-2	Raster	<p>Bränslekarta för FARSITE och WildFire Analyst. Denna skapades genom att konvertera bränsletyperna i Prometheus till bränsletyper enligt Anderson (1982). Här finns det ingen enkel översättningsnyckel men vi bedömde att följande matchning var den bästa:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Typ 1. Short grass = Prometheus class O1 (class 31) - Typ 5. Brush (2 feet) = Prometheus class M2 (class 50) and/or C3 and C4 (class 3 and 4) - Typ 8. Closed timber litter = Prometheus class C3 and C4 (class 3 and 4) - Typ 11. Light logging slash = Prometheus class S1 (class 21) - Typ 0. No data = Prometheus class non-fuel (101)

6.1.5 Data för Prometheus

I tabell nedan ges använda data för simuleringar med Prometheus.

Tabell 3. Data för Prometheus

Form	Data
Vektorform	vägar, rinnande vatten, sjöar, obrända ytor.
Rasterform	höjd över havet, trädhöjd, andel barrträd, bränslemängd_bränsletyp31, CBH_NFI, CFL, bränsletypskarta-1.

6.1.6 Data för Farsite

I tabell nedan ges använda data för simuleringar med Farsite.

Tabell 4. Data för Farsite

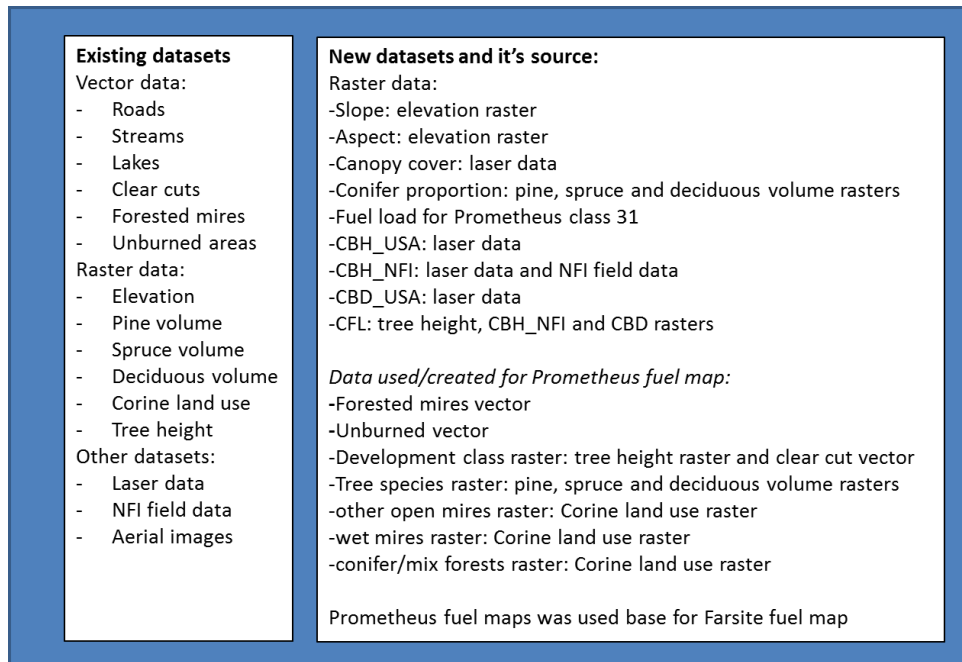
Form	Data
Vektorform	vägar, rinnande vatten, sjöar, obrända ytor.
Rasterform	höjd över havet, lutning, lutningsriktning, bränslekarta-2, krontäckning, trädhöjd, CBH_NFI, CBD_USA. De tre sistnämnda är inte obligatoriska.

6.1.7 Data för Wildfire Analyst

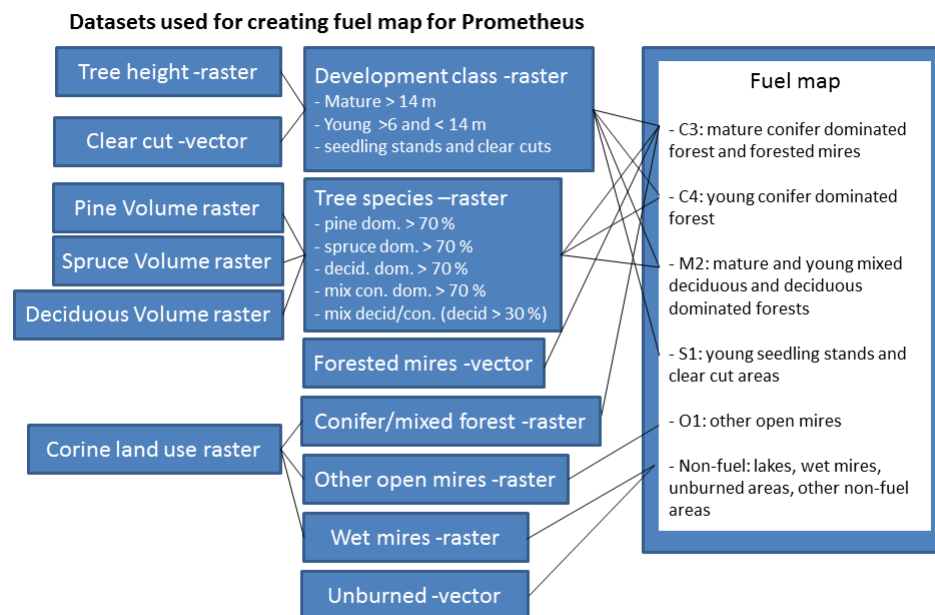
I tabell nedan ges använda data för simuleringar med Wildfire Analyst.

Tabell 5. Data för Wildfire Analyst

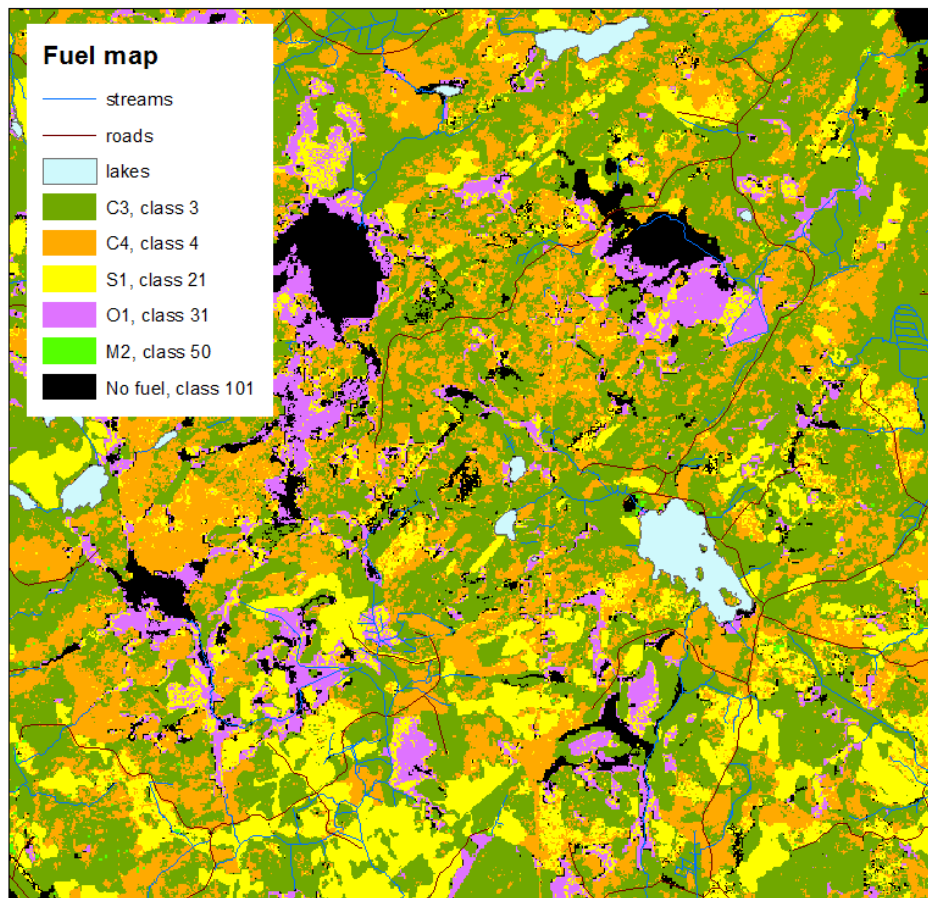
Form	Data
Vektorform	vägar, rinnande vatten, sjöar, obrända ytor.
Rasterform	höjd över havet, bränsletypskarta-2, trädhöjd, krontäckning, CBH_NFI, CBD_USA. Vad gäller trädskiktet är bara CBH och NFI obligatoriska.



Figur 1. Summering av befintliga och nyskapade dataset som användes i simuleringarna.



Figur 2. Bygget av en bränslekarta för Prometheus.



Figur 3. Bränslekarta-1 över Salaområdet, för användning i det kanadensiska systemet Prometheus.

7. Resultat

Alla de testade programmen ger möjlighet att sätta både punkt- och linjetändningar, samt att lägga in bränslebarriärer och andra barriärer som vektordata. Där kan även specificeras bland annat vissnings-graden för bränslet på gräsmark. I Prometheus kan man även lägga till "fuel and weather patches" som vektordata. I WildFire Analyst kan man också addera öppet vatten, strömmande vatten och vägar i form av raster-data, liksom att även placera in egna ny-tolkningar av bränsle-situationen i området, när man märkt att verkligheten inte stämmer med det kartunderlag man har.

I både Prometheus och Farsite kan antingen dagliga (vilka modifieras av programmet över dygnet) eller timvisa väderdata användas, men i Wildfire analyst kan man också köra med funktionen "konstant väder", eller ladda ner väderdata från en web-service. För alla program gäller dock att relativt små skillnader i data-seten kan ha stor betydelse för utfallet, vilket är viktigt att komma ihåg, eftersom dataunderlaget alltid är behäftat med osäkerhet.

7.1 Prometheus

Hantering av programmet. Det är enkelt att skapa projekt och importera data i Prometheus för den som är van att arbeta med GIS-program. En del input-data har parametrar som kan ändras "på plats", exempelvis bredd på vägar eller andra brandhinder. Bränsletyperna kan inte modifieras, men däremot fukthalter. Gränssnittet är användarvänligt och man lär sig snabbt att använda programmet och att skapa och köra olika scenarier. Färgkodningen är utmärkt och panelen på vänster sida av skärmen underlättar när man kör olika scenarier eller dataset (Figur 4).

När ett scenario skapas är det möjligt att välja mellan olika data för en viss simulering (Figur 4). Det kan exempelvis gälla olika väderscenarier, olika antändningspositioner, varierande brandhinder och rasterdata såsom trädhöjd och undre krongräns. Brandförutsättningarna kan också manipuleras timvis genom att ändra FWI, vindstyrka och luftfuktighet. Även vissa attribut rörande brandspridning och övrigt brandbeteende kan ändras i "simulation settings".

När allt detta har definierats kan ett scenario sparas och simuleringen startas. Simuleringstiden beror på flera faktorer, bland annat hur många spatiala data-lager som skall inkluderas, pixelstorlek samt hur långt man kör simuleringen. Det kan ta allt mellan 5 och 15 minuter att simulera de första 12 timmarnas brandspridning, beroende på hur många lager som inkluderas. Fler lager betyder en mer realistisk simulering över komplexa landskap.

Under en körning blir programmet successivt allt mer trögt, i och med att brandens omkrets växer. Det är inte realistiskt att simulera mer än två dagars brandspridning.

På skärmen visas fortlöpande brandområdets yttergränser i form av röda linjer för positionen efter valbar tid, exempelvis 2-timmars steg (Figur 6).

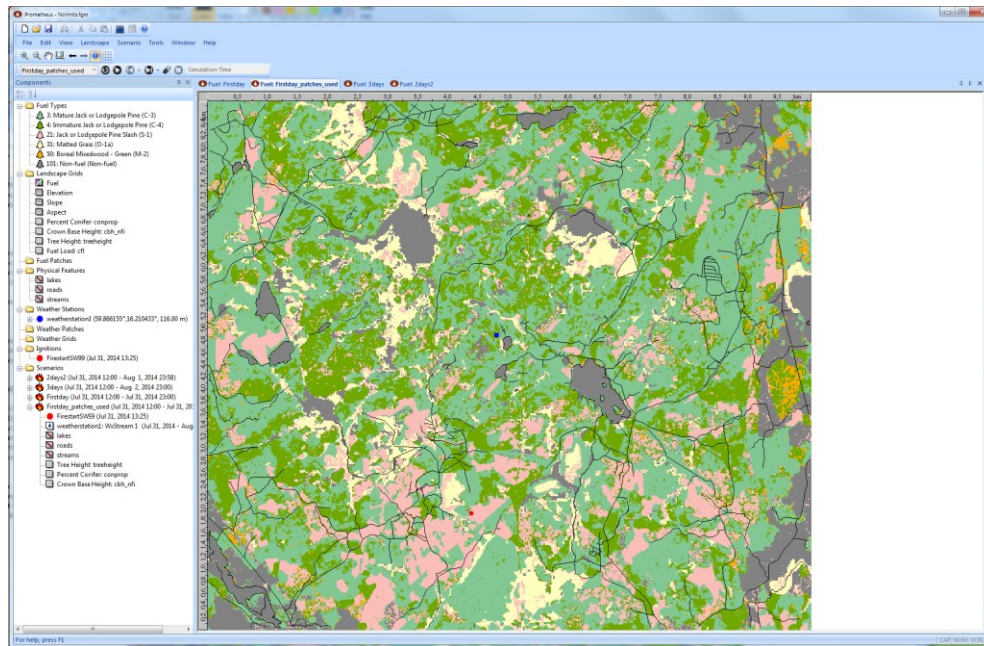
Efter simuleringen kan man granska och även exportera diverse statistik från simuleringen. Via "Map query" kan man se landskapsinformation, väder och brandbeteende i enskilda pixlar man klickar på (Figur 7).

"FBP calculator" gör det möjligt att analysera brandvariabler för olika bränsletyper. Det går också att få fram statistik för varje tidssteg av simuleringen (Figur 7) och exportera en scenario-rapport med brandgräns i vektorformat samt rasterdata för övrig statistik. Att skapa raster tar ett antal minuter och några gånger ledde det till att programmet kraschade, vilket kan ha att göra med att vi använde relativt hög upplösning i de spatiala data-skikten.

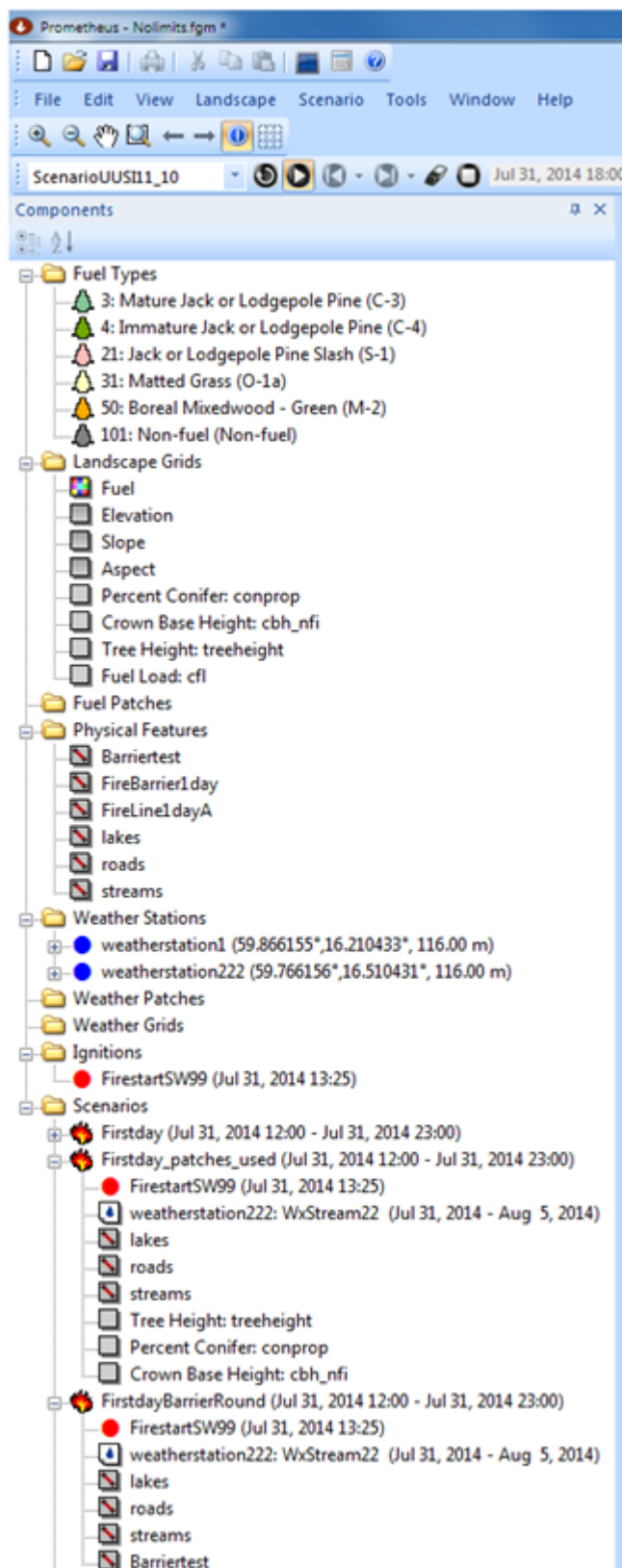
Scenarier kan sparas, men inte själva simuleringen, så nästa gång programmet öppnas får man köra simuleringen på nytt. På grund av att det finns vissa icke-deterministiska element i simuleringen kommer man för övrigt aldrig att få två helt identiska utfall, även om ingångsdata är identiska.

För att kunna analysera eller visa simuleringsresultat i rasterform måste de importerats till andra datorprogram såsom ArcGIS (se Figur 8).

Simuleringens träffsäkerhet. När inga restriktioner sattes i form av brandhinder etc. gav simuleringen något snabbare brandspridning än den som observerats under Salabrandens initialskede, men i grova drag överensstämde spridningsbilden och spridningshastigheten väl över de första 12 timmarna. Genom att applicera spridningshinder längs de kända uppvattnade begränsningslinjerna samt att sätta en spärr för brandspridning vid hög luftfuktighet under natten fick vi en spridningsbild som låg ännu närmare den observerade under hela första dygnet. Resultaten tyder på att de "kanadensiska" bränsletyper vi använde kan ge realistiska simuleringar. Vidare modifieringar kan göras för bland annat bränslefukthalter. Vid bedömning av utfallet bör man också tänka på att ingångsdata i form av grid-väderdatat inte kan förutsättas avspegla de autentiska förhållandena perfekt, även om det i en så uttorkad situation som i Sala främst är luftfuktighet och vind som spelar roll.



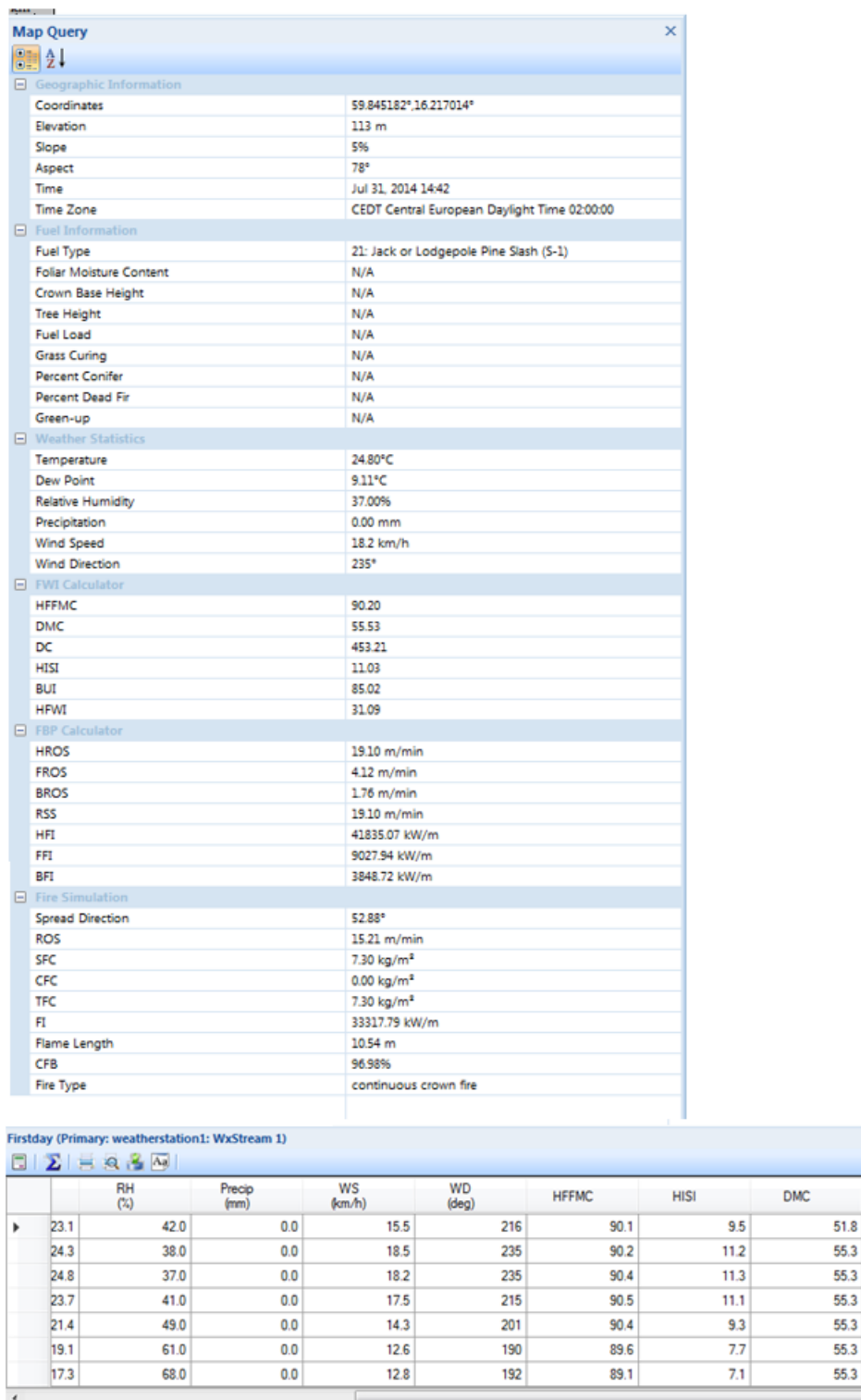
Figur 4. Prometheus användargränssnitt.



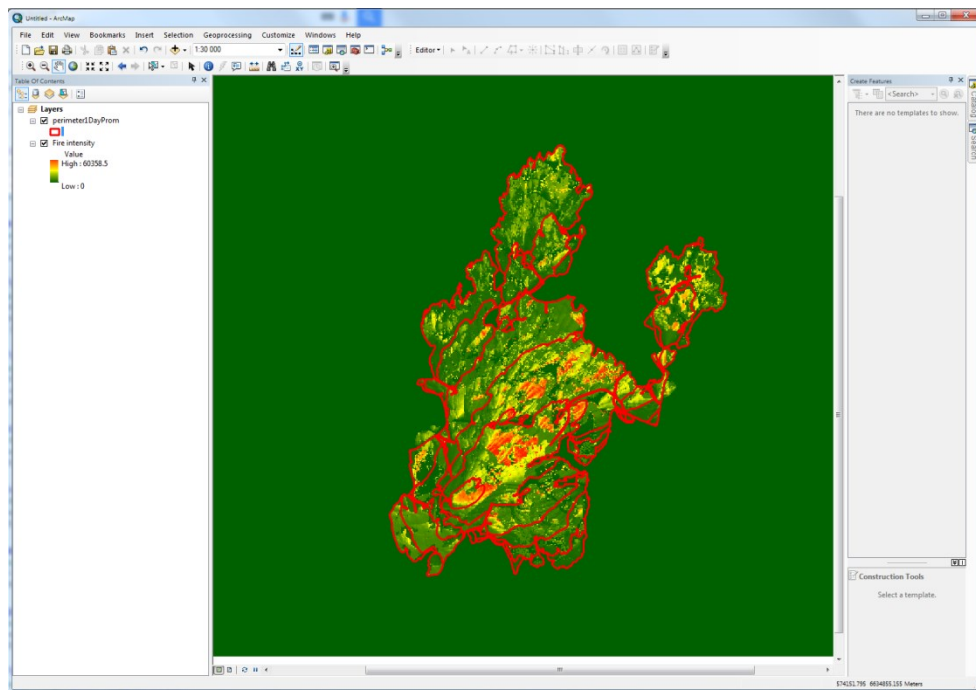
Figur 5. Panelen i Prometheus som används för att visa och redigera indata och scenarier.



Figur 6. Prometheus-simulering av den första dagens spridning av Sala-branden, när inga begränsningar i form av bevattnade spärrlinjer satts in. De röda linjerna illustrerar brandområdets yttergräns med 2-timmars intervall.



Figur 7. Exempel på "Map query" (överst) och statistikutdrag (undre tabellen) från en Prometheus-simulering.



Figur 8. Exempel på output från Prometheus: Spridnings- och intensitetskarta efter att den importerats i ArcGis.

7.2 FARSITE

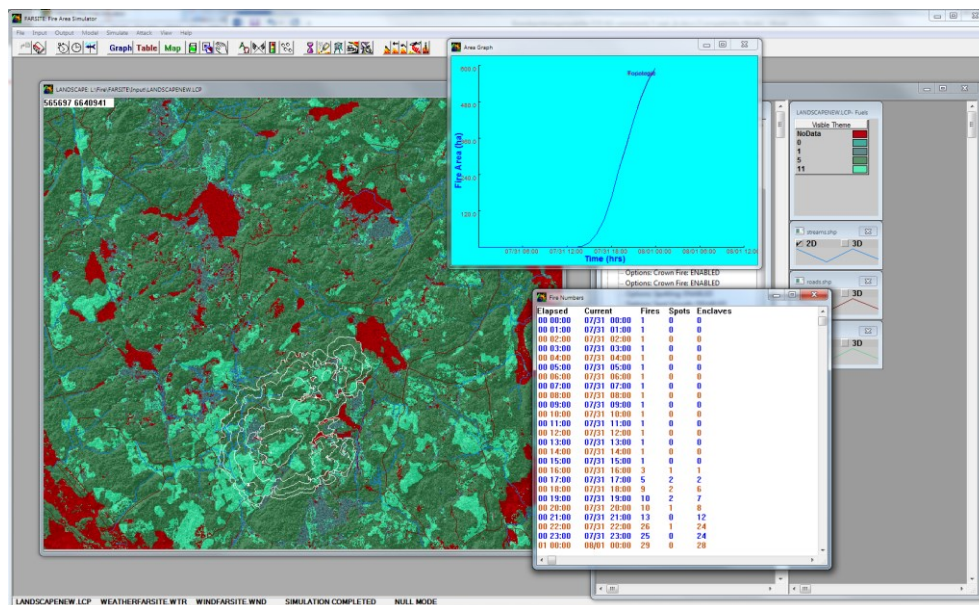
Hantering av programmet. Användargränssnittet för Farsite är gammalmodigt men lättanvänt (Figur 9). Det är enkelt att skapa projekt och importera data. Användaren kan lätt göra egna justeringar av fukthalt och bränsletyper och även göra helt egna bränslemodeller. Även trädskiktets karakteristika kan modifieras. Före körning av en simulering definierar man bland annat ingångsfukthalt för skilda bränslekategorier. I Farsite är det också möjligt att påverka branden med bekämpningsåtgärder både från luften (vattenbombning) och från marken (spärrlinjer med viss antagen bygghastighet och bredd), men detta testade vi aldrig.

Simuleringstiden för det första dygnets brandförlopp tog bara några sekunder, men simuleringshastigheten sjönk med brandområdets storlek. Ett exempel på simuleringresultat ges i Figur 10.

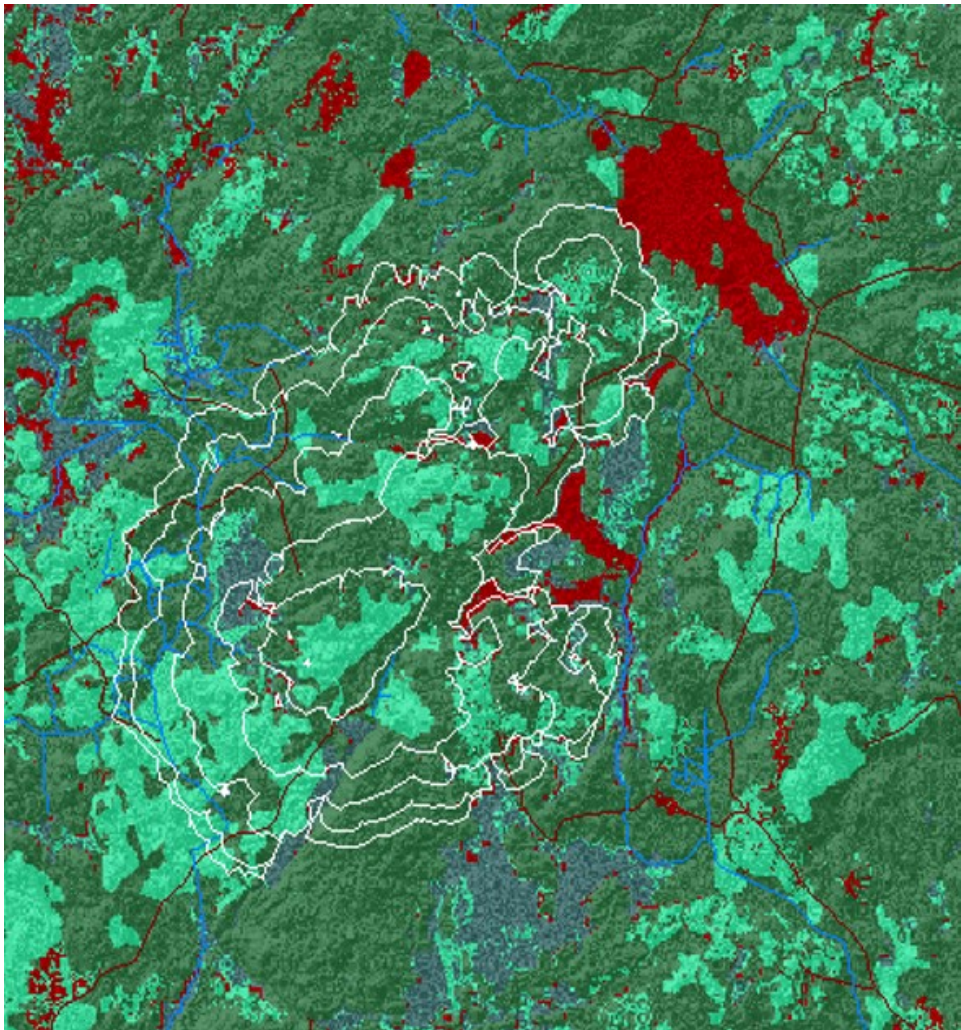
Efter att simuleringen är avslutad kan man se resultaten i enkla grafer och tabeller och exportera vektor och raster-skikt på liknande sätt som i Prometheus. Landskaps och brandinformation för enskilda pixlar visas när man klickar på dem. I Farsite går det också att granska raster-kartor direkt i programmet (map view), men datat måste då först plockas från resultatdatabasen (Figur 11). Liksom i Prometheus måste simuleringen köras om efter att programmet stängts ner, men simuleringinställningarna kan sparas som bokmärken.

Simuleringen träffsäkerhet. Till en början gav simuleringarna alldeles för långsam brandspridning och för liten vindeffekt, jämfört med Salabrandens verkliga utfall. Efter omfattande ”felsökning” visade det sig att programmet

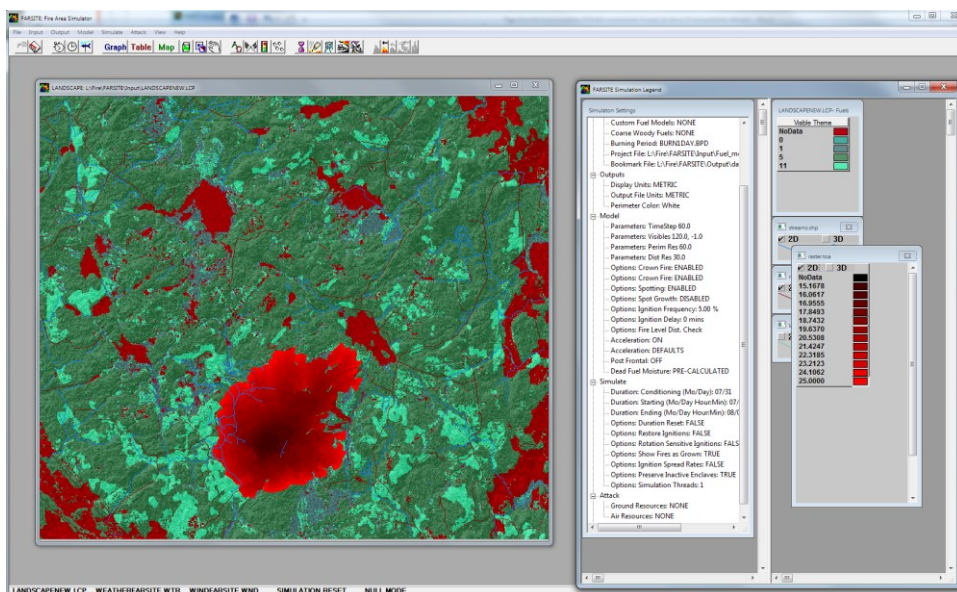
inte kunde hantera så pass hög krontäckning i trädskiktet som vi hade i våra data. Detta löstes genom att antingen (1) modifiera spridningsfaktorn i bränsletyp 5 och 11 för att öka spridningshastigheten utan att ändra bränsletyp eller krontäckning eller (2) genom att sätta krontäckningen mycket låg samt byta till bränsletyper med snabbare spridning (från #5 till #6 och från #11 till #12). Båda dessa alternativ resulterade i mer realistisk brandspridningshastighet. En annan möjlighet vore att konstruera helt egna bränsletyper baserade på uppmätta bränsledata. Trots modifieringarna gav Farsite en alltför liten inverkan av vinden på spridningshastigheten, vilket resulterade i en för snabb flankspridning relativt spridningen i brandens huvud, det vill säga en alltför rund form i jämförelse med den verkliga branden.



Figur 9. Användargränssnitt för Farsite.



Figur 10. Exempel på brandutbredning över tiden under den första dagen vid en Farsite-simulering, när inga spärrlinjer satts in.



Figur 11. Exempel på brandintensitets-karta från Farsite-simulering.

7.3 WildFire Analyst

Hantering av programmet. Det är svårare att komma igång med Wildfire Analyst än Prometheus och Farsite eftersom användargränssnittet har fler funktioner. En manual är definitivt nödvändig, men efter en del träning är programmet trots allt relativt användarvänligt. Först definieras ett antal inställningar samt input data och eventuell efteranalys. "Map view" kan göras i Arcgis och importeras i programmet (Figur 12). Rent visuellt liknar gränssnittet Arcgis och kartredskapen är desamma. När scenariot sätts kan man välja vilken workspace och analys som skall användas. Sedan bestäms väderscenarioet, där man har större flexibilitet än i de övriga programmen. Bränsletyperna är även de möjliga att modifiera underhand genom att ändra vissa bränsleattribut i selekterade delar av kartan.

Simuleringstid bestäms på förhand liksom vilket kartutsnitt som skall användas. Likaså bestämmer man om kronbrand skall ingå i simuleringen. Innan simuleringen kan man definiera olika vektordata såsom antändningspunkter, brandgator, områden med avvikande bränsle etc.

Olika simuleringar kan väljas: "Propagation", "Evacuation time", "Reverse time", "Adjust" and "Probabilistic". Dessa beräknar brandspridning, evakueringstider, "bakspårning" från slutlig brandutbredning för att hitta antändningspunkt etc, sannolikhetsberäkningar av spridningshastighet vid skilda vind och bränslefukthalter. Vad gäller detta har vi bara testat "Propagation mode."

Programmet arbetar snabbt. Simulering av den första dagens brandspridning varierade mellan 15 sekunder och en minut beroende på indata och inställningar.

Resultatet visas i kartform direkt efter simuleringen (Figur 12, 13 & 14) och visar även input-data såsom antändningspunkter och bränsletyp samt brandutbredning, flamlängd, brandintensitet, spridningshastighet och typ av brand (löpbrand/kronbrand). WildFire Analyst genererar fortlöpande simuleringsrapporter (Figur 15). Dessa kartor kan också öppnas i Google Earth (Figur 16). Jämförelser mellan olika simuleringar är enkla att göra eftersom alla kartresultat visas i en innehållsförteckning.

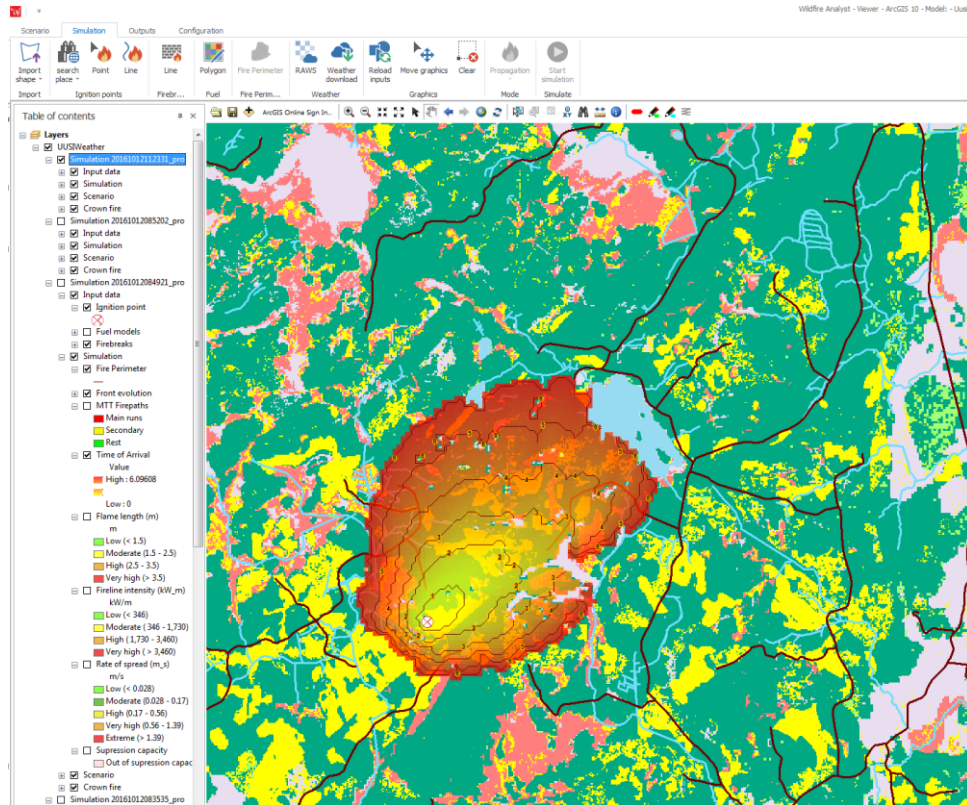
Wildfire analyst har också en bränslefuktkalkylator där bränslets fukthalt över tiden visas grafiskt och där vädret kan justeras.

Simuleringens träffsäkerhet. Programmet hade liknande problem som Farsite i det att spridningshastigheten var lägre än i verkligheten. Liknande modifieringar prövades, som att ändra bränsletypen respektive att plocka bort trädskiktet. Det var då lättare att nå rimlig spridningshastighet. Även vid snabb brandspridning (och hög intensitet) var det svårt att generera kronbrand när trädskiktet inkluderades. Vi diskuterade detta med programutvecklarna, men någon lösning på problemet gick inte att få vid tillfället.

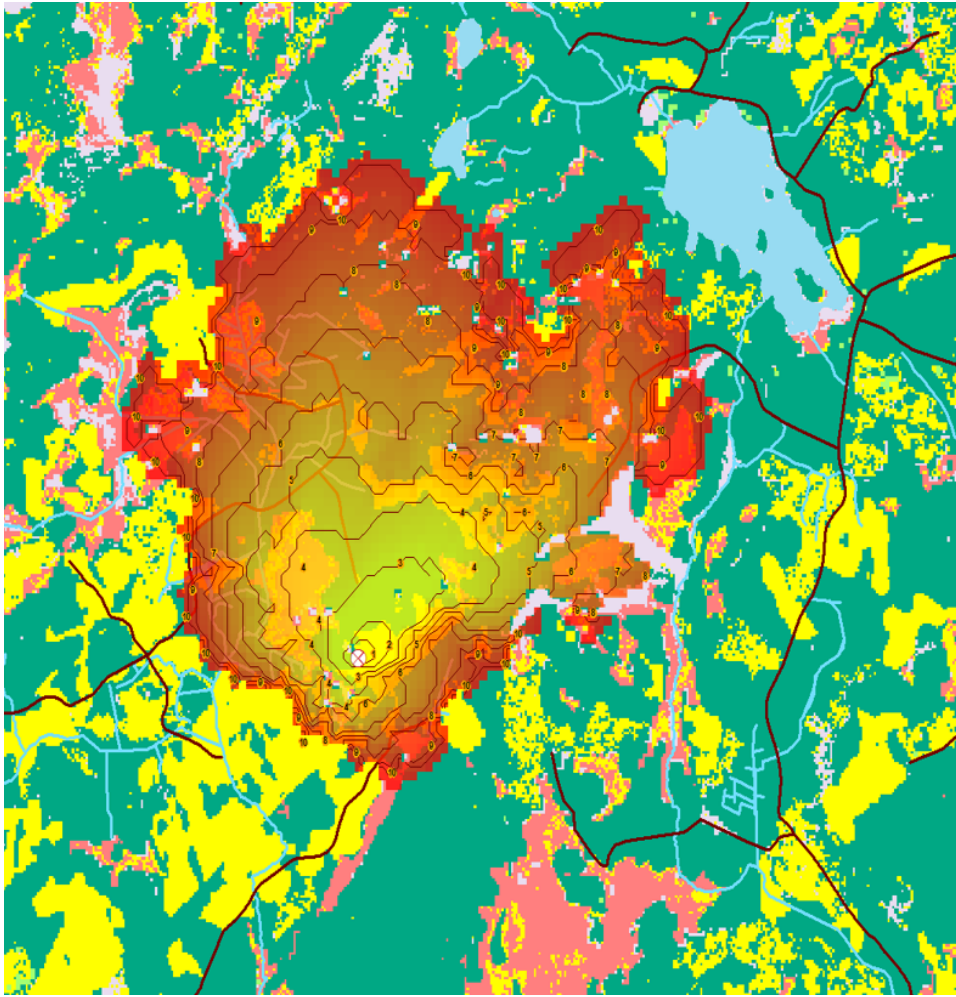
Genom att sänka bränslefukthalten gick det enkelt att höja spridningshastigheten till en realistisk nivå. Brandspridningen tenderade dock

liksom i Farsite att gå för hastigt på flankerna, vilket resulterade i en alltför lite utdragen slutlig form på branden. Enligt programutvecklarna hade man sett detta även i andra simuleringar.

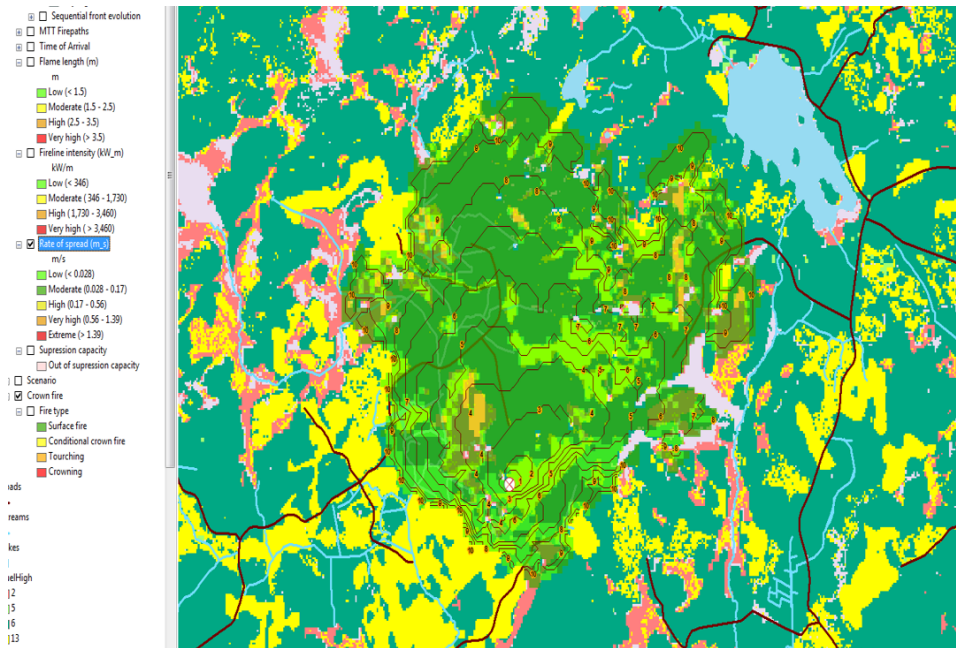
WildFire analyst är ett avancerat program med möjlighet till flera olika analyser, men det förefaller inte helt färdigutvecklat.



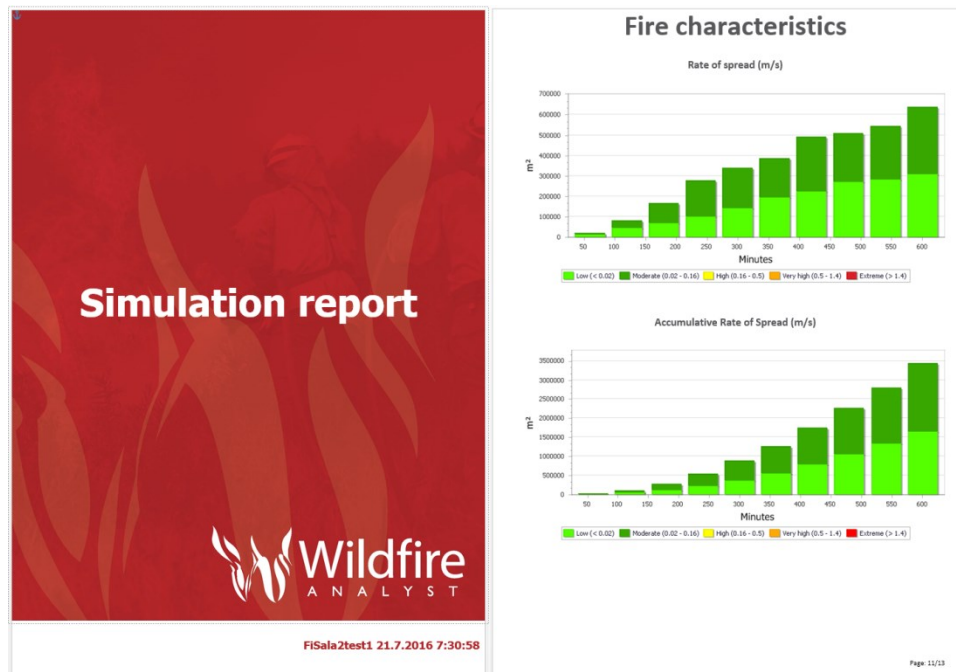
Figur 12. Användargränssnitt och "map view" i WildFire Analyst.



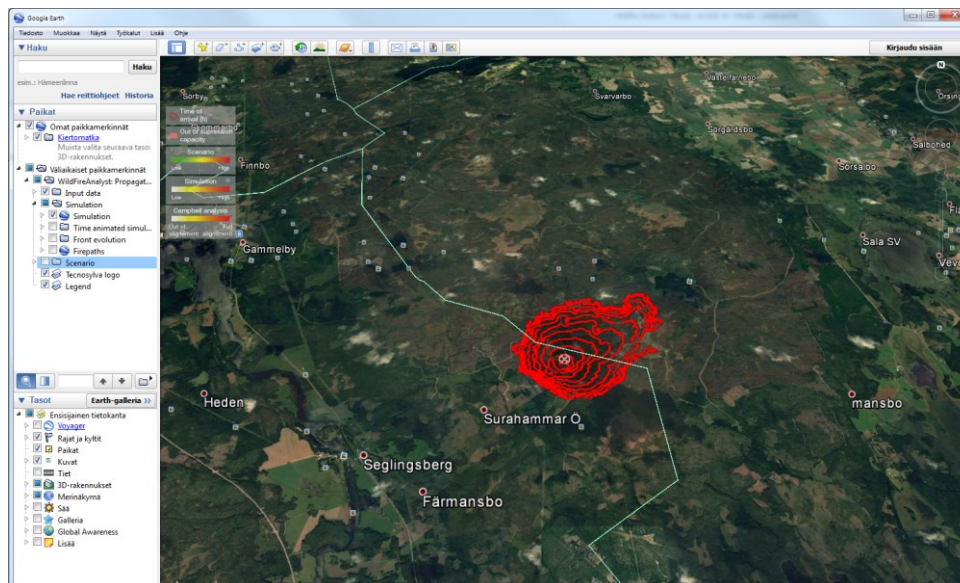
Figur 13. Exempel på simuleringsresultat från WildFire Analyst med modifierade bränsletyper och krontäckning: brandutbredning och ankomsttid för branden.



Figur 14. Samma simulering som i Figur 110, men display av brandutbredningen och spridningshastigheten i tidsintervall.



Figur 15. Exempel på simuleringsrapport för WildFire Analyst.



Figur 16. Resultat från WildFire Analyst importerat i Google Earth.

7.4 Jämförelse mellan olika program

Program för brandsimulering försöker hantera den komplexa interaktionen mellan en hel mängd faktorer som påverkar vegetationsbränders beteende i landskapet. Det är därför inte förvånande att det ofta krävs fortlöpande justeringar av ingångsdata och programinställningar för att få realistiska simuleringar. Den personal som gör simuleringarna måste därför ha en hög kompetens vad gäller bränslefördelning i landskapsskala och brandbeteende generellt, förutom erfarenhet av GIS-data och att hantera själva simuleringssystemet. I tabell 6 görs en översiktlig jämförelse mellan de tre testade programmen.

Alla programmen har omfattande manualer som var till stor hjälp för hanteringen, men ändå dök det upp problem som var svårlösta utan hjälp från

Tabell 6. Jämförelse mellan olika program

Prometheus	Farsite	WildFire Analyst
+ Enkel att använda	+ Snabb simulering	+ Snabb simulering
+ Ger realistiska resultat direkt	+ Avancerade redskap som är enkla att hantera	+ Möjlighet till multipla analyser
- Något långsam simulering	- Svårt att erhålla realistisk spridningshastighet	+ Lätt att jämföra simuleringar
-Kan inte visa alla resultatet i kartform		-Ej färdigutvecklat
		-Svårt att erhålla realistisk spridningshastighet

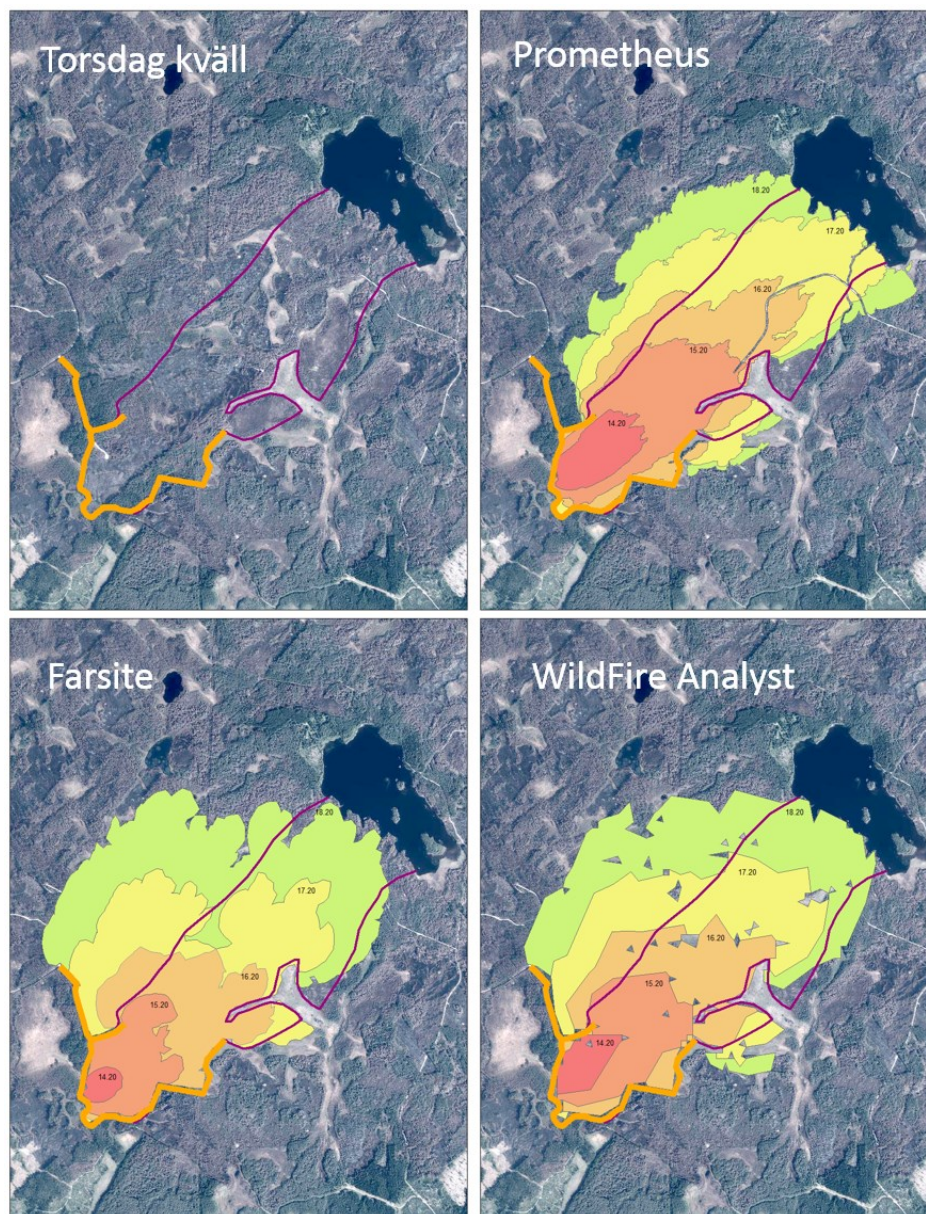
programutvecklarna. I synnerhet Farsite och WildFire Analyst hade en hel del extra funktionalitet som skulle kräva mer testning för att kunna bedöma värdet av.

Programmets input-data och interna logik är likartad, men vissa hade mer avancerade extrafunktioner för analys och presentation. I Farsite och WildFire Analyst kan man lättare modifiera bränsletyperna och justera spridningshastigheten. Å andra sidan gav båda dessa program sämre simuleringsresultat även efter justeringar. Alla programmen gav någotsånär rimliga simuleringar, men för Farsite och WildFire Analyst krävdes det fler modifieringar och resultatet blev ändå inte lika bra som i Prometheus, i synnerhet vad gäller längd/bredd ratio. Simuleringstiden var väsentligt längre i Prometheus, men för måttligt stora områden rör det sig trots allt bara om några minuter. I ovanstående tabell ges en översiktlig bedömning av intrycken av de ingående brandspridningsmodellerna efter att ha applicerat dessa på Salabranden.

I Figur 17 visas brandspridningen över de första fem timmarna efter antändning som de simulerats i de olika programmen. I detta fall har spridningen begränsats av de spärrlinjer som tidigt sattes in i flank och rygg nära startpunkten i södra delen. Bränsletyper och spridningshastighet har modifierats för att bättre anpassa sig till observerad spridning när det gäller Farsite och WildFire Analyst, men inte för Prometheus. Den verkliga brandutbredningen under första dagen är bedömd från observationer på plats och flygbilder.

Inget av programmen kan hantera simuleringar över flera dygn med någon högre grad av realism. Programutvecklarna för WildFire Analyst rekommenderar exempelvis inte simulering för längre perioder än 48 timmar. Fel tenderar att förstärkas ju längre en simulering drivs och för Prometheus kan programmet även krascha vid alltför stor belastning. Av dessa skäl har vi begränsat simuleringen av Salabranden till bara den första dagen.

“Svenska” bränslen är inte väl klassificerade, även om vissa förarbeten har gjorts för att åstadkomma en nationell bränslekartering. Dessutom är programmen delvis riktade mot helt andra situationer (exempelvis vad gäller träddarter och väderinflytande) än de som råder i Sverige. Av dessa skäl var det en approximation att skapa en bränsle-typning som underlag för simuleringarna i de olika programmen, trots att vi då byggde på erfarenhet av såväl USAs och Kanadas bränsleklasser som vegetationen i Salaområdet. Ett mer systematiskt arbete skulle behöva göras för att kunna ”översätta” våra bränsleförhållanden till bästa input för programmen. Detta gäller både markbränslen och bränslena i trädskiktet.



Figur 17. Brandspridning över de första fem timmarna efter antändning av Salabranden, simulerade med tre olika program. Branden larmades kl 13.29, men vi antar att själva antändningen skedde kl 13.20. Prometheus generade bäst passning mot verklig brandspridning, trots att en del extra anpassning gjordes för Farsite och WildFire Analyst. Brandens troliga yttergräns under första kvällen visas med lila linje. Ett antal begränsningslinjer hade vattnats upp av brandförsvaret och de som vi bedömt hade en reell inverkan på brandspridningen illustreras med orange. Vid simuleringarna har dessa satts som absoluta, dvs utan möjlighet för elden att korsa linjen.

7.5 Vad behövs för att implementera en brandspridningsmodell i nationell skala?

Det finns alltså ingen färdig infrastruktur där man kan plantera in någon av de ovan behandlade brandspridningsmodellerna, med undantag för den icke-spatiala RedApp. Ett antal olika steg måste först tas och en del av dessa kan kräva avsevärt arbete. De följande är nödvändiga:

- **Högupplösta väderdata.** Lätt tillgängligt redan idag vad gäller dagliga värden för situationen mitt på dagen (via brandrisksystemet); timdata kan kräva nya vägar för överföring.
- **Pålitlig bränsleklassificering.** Ett system för bränsleklassificering saknas ännu i landet. Efter utprovning och testning av ett klassificeringssystem måste en heltäckande kartprodukt byggas.
- **Terrängmodell.** Lätt att skapa med nuvarande dataunderlag.
- **Tilläggsdata.** Diverse ytterligare data (bebyggelse, potentiella brandhinder) kan förbättra analysen men är inte nödvändiga.
- **Modellanpassning.** Dessa modeller är designade för andra regioner, med delvis annorlunda bränslekonstellationer. Viss anpassning kan göras relativt enkelt i programmen, men förutsätter ett underlag från fältobservationer eller experimentbränningar.
- **Utbildning.** För att bruka dessa brandspridningsmodeller krävs utbildad personal med ingående kännedom både brandbeteende och själva hanteringen av programmen. Även för en person med erfarenhet av GIS tar det minst en vecka att bemästra användningen.

Av dessa steg är förmodligen bränsleklassningen och modellanpassningen de svåraste. Sen kan man ställa olika krav på dessa beroende på om man tänker sig operationell användning i samband med pågående bränder, eller bara vill använda en spridningsmodell i utbildningssyfte för brandbefäl. Operationell användning förutsätter att modellen visat sig ge rimliga prediktioner i ett brett spektrum av verkliga fall.

Vi ser inte något behov att utveckla en helt egen brandspridningsmodell för svenska förhållanden. Dels skulle det innebära mycket stora utvecklingskostnader och dels är det osannolikt att man skulle nå ett bättre resultat än med existerande modeller. Däremot finns det troligen en stor förbättringspotential i dessa, framförallt vad gäller bränsleklassningen. Här bör man försöka bygga en databas av brandspridningsobservationer från vilda bränder och experimentbränningar i skilda bränsletyper och väder, för att kunna verifiera modelldata. Man bör också se till att väga in olika modellerings-aspekter i allt framtida arbete med en nationell bränsleklassning.

8. Referenser

- Alexander M.E. , C. M. G., 2012: Are the applications of wildland fire behaviour models getting ahead of their evaluation again? *Environmental Modelling & Software* **41**, 65-71.
- Dunn A, Milne GJ, 2004 [Modelling Wildfire Dynamics via Interacting Automata](#). Proceedings of the 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2004), Amsterdam, The Netherlands, October 25-28, 2004. In *Lecture Notes in Computer Science* 3305, Editors: Peter M. A. Sloot, Bastien Chopard, and Alfons G. Hoekstra, pp. 395 - 404, Springer, Volume 3305/2004, 395-404, DOI: 10.1007/978-3-540-30479-1_41.
- Finney, M.A. 2004. FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research paper RMRS-RP-4.
- French, I.A., Anderson, D.H. och Catchpole, E.A. 1990. Graphical simulation of bushfire spread. *Mathematical and Computer Modelling* 13(12), 67-71.
- French, Ian 1992. Visualisation techniques for the computer simulation of bushfires in two dimensions. Magisterexamen, University of New South Wales, Australian Defence Force Academy, Canberra. Permanent länk: <<http://handle.unsw.edu.au/1959.4/38721>>.
- Granström, Anders 2009. Skogsbränder under ett förändrat klimat – En forskningsöversikt. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), publikationsnummer MSB 0014-09.
- Hansen, R., 2003: Skogsbrandsläckning. MSB, PUBU30-623
- Hansen, Rickard 2010. Förstudie: modellering av vegetationsbränder. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), ISBN 978-91-7383-074-4.
- Lopes, A.M.G., Cruz, M.G. och Viegas, D.X. 2002. FireStation - An integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software* 17(3), 269-285.
- Johnstron, P., Milne, G. och Klemitz, D. 2005. Overview of bushfire simulation systems. Internet.
- Jönsson, C. och Linåker, J. 2010. Fördjupningsstudie: Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Examensarbete vid Lunds tekniska högskola, rapport 5348.
- Mandel, J., S. Amram, J. D. Beezley, G. Kelman, A. K. Kochanski, V. Y. Kondratenko, B. H. Lynn, B. Regev and M. Vejmelka (2014). "Recent advances and applications of WRF-SFIRE." *Natural Hazards and Earth System Sciences* **14**(10): 2829-2845.

-
- Mazzoleni, S., Giannio, F., Beccarisi, L. och Ricotta, C. 2008. Comparison of fire model tool. Delleverans D6.2-3 inom projektet *Fire Paradox*. Europakommissionen, projektnummer FP6-018505.
- Opperman, T., Gould, J., Finney, M. och Tymstra, C. 2006. Applying fire spread simulators in New Zealand and Australia: Results from an international seminar. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41*.
- Papadopoulos, George D. och Pavlidou, Fotini-Niovi 2011. A comparative review on wildfire simulators. *IEEE Systems Journal* 5(2), 233-243.
- Pearce, H. Grant 2009. Review of fire growth simulation models for application in New Zealand. SCION klientrapport nr. 16246.
- Perry, G.L.W. 1998. Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. *Progress in Physical Geography* 22(2), 222-245.
- Sullivan, A.L. 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. *International Journal of Wildland Fire* 18, 349-403.
- Tymstra, C., Bryce, R.W., Wotton, B.M., Taylor, S.W. och Armitage, O.B. 2010. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Information report NOR-X-417.

Bilaga 1

I tabell nedan ges de specifika kriterierna som använts för jämförelse mellan olika testade program.

Utvärderingsparameter	Möjliga svar
Nationellt ursprung	
Utvecklingssyfte	Operativ / Analytisk
Plattform (Hårdvara/Operativ)	PC - Kluster / Windows-Linux
Utvecklingshistorik	Årtalsangivelse
Simuleringsteknik	Cell / Vektor
Beräkningstider	Tidsangivelse
Valideringsnivå	Mycket god / God / Dålig
Dokumentation	Mycket god / God / Dålig
Transparens i beräkningar	Mycket god / God / Dålig
Modellkategori	Fysikalisk / Statistisk / Semi-empirisk (se text)
Kronsbrandsmodell	Ja / Nej
Flygbrandsmodell	Ja / Nej
GIS-funktionalitet	Ja / Nej
Indata	
Topografi	Ja / Nej
Använder FWI	Ja / Nej
Varierbart väder	Ja / Nej
Inläsningsmetod för väderdata	Manuellt/Dataström/Väderstation/Prognos/Web
Använder rasterade vindfält (t.ex. WindWizard/WindninJa)	Ja / Nej
Solinstrålning	Ja / Nej
Bränslefukthalt	Ja / Nej
Bränsleklasser	Standard / Modifierbar
Rimlig karterade upplösning	Storleksangivelse
Utdata	
Flamhöjd	Ja / Nej
Intensitet	Ja / Nej
Rök	Ja / Nej
Möjlighet att ändra parameterar i brandområdet under körning. (Stokastisk eller deterministisk.)	Ja / Nej
Brandgator	Ja / Nej

Teknisk Support	Ja/ Nej
Användarvänlighet	
Licenskostnad	Ja/ Nej
Om ja	Stor / Medel / Liten
Källkod fritt tillgänglig	Ja/ Nej
Kommentar	
Måluppfyllelse	
Anpassningsbarhet	1 - låst 2 -möjligt att ändra viktiga parametrar 3 - fullt anpassningsbar
Användarvänlighet (Operativt syfte)	1 - Forskar-nivå 2 - Expert-nivå 3 - Lokal-nivå
Prestanda	1- låg 2 - mellan 3 - hög
Summerad måluppfyllelse	

Tabell B1. Specifika kriterier som använts för jämförelse mellan olika testade program.

Bilaga 2

Informationen om och sammanställningen av ett drygt 20-tal brandspridningsmodeller återfinns i ett fristående kalkylark som sänts till MSB.
