

Risker med brandutsatt oexploderad ammunition (OXA) vid Skillingaryds skjutfält

Viktor Arozenius | Avdelningen för Brandteknik | LTH |
LUNDS UNIVERSITET



**Risker med brandutsatt oexploderad ammunition (OXA) vid
Skillingaryds skjutfält**

Viktor Arozenius

Lund 2020

Titel: Risker med brandutsatt oexploderad ammunition (OXA) vid Skillingaryds skjutfält
Title: Risks with fire exposed UXO at Skillingaryd's firing exercise area

Författare/Author: Viktor Arozenius

Disclaimer: Författaren ansvarar för innehållet i rapporten.

Report: 5600

ISRN: LUTVDG/TVBB--5600--SE

Antal sidor/Number of pages: 50

Bilder/ Illustrations: Alla bilder och figurer i rapporten tillhör författaren om ingen annan källa är angiven/ All pictures and figures belong to the author if no other reference is stated.

Sökord

Skillingaryd, skjutfält, OXA, brand, ammunition, skogsbrand

Keywords

Skillingaryd, firing exercise area, UXO, fire, ammunition, wildland fire

Abstract

Located all around Sweden there are firing exercise areas with areas containing UXO (Unexploded ordnance) from years of exercise drills. This study aimed to investigate the risk when UXO are exposed to wildland fire at one of their locations, namely Skillingaryd's firing exercise area. The study was conducted with an initial literature study with the purpose to check what had been done before. The literature study found three (3) reports in total, two (2) conducted by branches of the Swedish armed forces and one (1) conducted by the Norwegian defense research establishment. All three reports draw the conclusion that exposing ammunition to heat leads to detonation. Using two different models, calculations was done to investigate whether a wildland fire at Skillingaryd could cause detonation. At ground surface a lumped heat capacity analysis was used. Below ground surface a numerical calculation was set up. A reasonable temperature-time curve was used to simulate the fire derived from further literature research. The calculated results showed without variation that the heat from the fires was not enough to cause detonation. The primary reason for this was thought to be how to calculations methods handled the explosive inside the ammunition. Since the literature study and the calculated results was inconclusive, the risk of wildland fire exposed UXO cannot be diminished.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2020

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2020.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

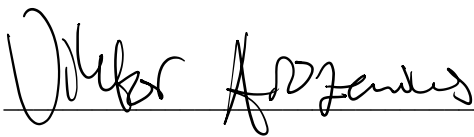
FÖRORD

Detta arbete har initierat av räddningstjänsten i Vaggeryds kommun och skrevs som ett examensarbete vid brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola.

Stort tack till alla som har hjälp till under arbetets gång genom att svara på frågor och mail. Ett extra stort tack vill jag rikta till följande personer för deras insats och medverkan, utan er hade arbetet aldrig blivit av.

| | |
|--------------------------|--|
| Håkan Frantzich | Brandingenjör och universitetslektor, avdelningen för Brandteknik <i>För god handledning och trevliga möten</i> |
| David Högberg | Brandingenjör och Stf. Räddningschef vid Vaggeryds kommun <i>För hjälp med arbetet, handledning och intressant frågeställning</i> |
| Jonas Wassborg | Skjutfältschef vid Skillingaryds skjutfält <i>För ett väldigt bra organiserat och informativt platsbesök</i> |
| Salam Mohammad | Forskningsansvarig vid SWEDEC <i>För att du delade med dig av kunskap och information kring granater</i> |
| Nils Johansson | Brandingenjör, biträdande universitetslektor, avdelning för Brandteknik <i>För hjälp med Biots tal</i> |
| Johan Karlelid | Brandingenjörstudent och vän <i>För god stämning och sällskap under arbetets gång</i> |
| Markus Jonsson | Brandingenjörstudent och vän <i>För många intressanta diskussioner och hjälp med korrekturläsning</i> |
| Gustaf Zetterberg | Brandingenjörstudent och vän <i>För hjälp med korrekturläsning</i> |
| Göran Carell | Försvarsmakten <i>För ett trevligt, informativt och vägledande samtal</i> |

Dessutom vill jag tacka min familj för ert eviga stöd med min flickvän Amanda i spetsen, tack!



Viktor Arozenius, Brandingenjör

Lund, 2020-01-14

SAMMANFATTNING

Runt om i Sverige finns det både aktiva och inaktiva skjutfält med OXA. OXA är ammunition som efter skjutning, tändning, kast, läggning eller fällning oavsiktligt inte har exploderat. Under sommaren 2018 fick en räddningsinsats vid en skogsbrand i Trängslet, Älvdalen, avbrytas då det framkom att det brann på ett område med OXA. Men hur farligt är det egentligen med brandutsatt ammunition? Och hur djupt ner når värmen från en skogsbrand?

Räddningstjänsten vid Vaggeryds kommun har sedan våren 2019 intensifierat arbetet med förebyggande åtgärder kring skogsbrandsrisken vid Skillingaryds skjutfält. Ett steg i deras arbete har varit att återupprätta en dialog med berörda aktörer, då framförallt med Försvarsmakten, Fortifikationsverket samt Länsstyrelsen i Jönköping. Ett annat steg har varit detta arbete, vars syfte har varit att undersöka hur en skogsbrand vid Skillingaryds skjutfält hade påverkat befintlig OXA och om det föreligger risk för termisk antändning av granaternas explosivämne.

Målet med arbetet var att analysera OXA:s beteende vid brandexponering och förstå hur värmetransporten sker när den utsätts för brand. Förståelsen skapades genom att genomföra värmebalansberäkningar för brandexponerad OXA. Ytterligare ett mål med arbetet var att skapa ett underlag för räddningstjänsten i Vaggeryd för deras fortsatta arbete med insatsplanering vid Skillingaryds skjutfält.

Metoden som valdes bestod av litteraturstudie, platsbesök vid skjutfältet samt värmetransportberäkningar. För beräkningarna användes två modeller: 1) För granater exponerade för bränder ovan markytan användes lumped heat capacity analysis. 2) För värmetransport under markytan användes en numerisk beräkningsmetod. Glödbränder i mark avgränsades bort, arbetet fokuserades således enbart på flambränder vid markytan.

Vid litteraturstudien hittades tre (3) artiklar som hanterar brandutsatt/värmexponerad ammunition, två svenska och en norsk. Samtliga tre drar slutsatsen att det finns en risk för att brandutsatt ammunition exploderar. Slutsatserna är baserad på väldigt olika undersökningar samt olika värmexponering.

Resultatet från beräkningarna visar entydigt att värmen från den dimensionerande temperatur-tid kurvan inte är tillräckligt för att värma upp brandutsatt ammunitions explosivämne till antändningstemperatur. Anledningen till att resultatet från litteraturstudien och beräkningarna skiljer sig åt förmodas vara beräkningsmetodernas sätt att modellera granaternas explosivämne. Det var framförallt beräkningsmetoden som användes för granater placerade ovan markytan som var för odetaljerad då endast en enhetlig temperatur för hela granatkroppen beräknades.

Analysen som har genomförts är med största sannolikhet den första i sitt slag, vilket innebär att det får anses som ett försök att bryta ny mark. Då det råder en stor osäkerhet kring beräkningsmetodernas applicerbarhet och indatas dignitet kan beräkningsresultatet inte användas som beslutsunderlag för att förbise risken med brandutsatt OXA.

ORDLISTA

| | |
|------------------|---|
| OXA | OeXploderad Ammunition |
| SWEDEC | Swedec (Swedish EOD and Demining Centre) är Sveriges kompetenscentrum för nationella och internationella uppgifter inom ammunitions- och minröjning |
| SVINGGR | Sprängvinggranat |
| SGR | Spränggranat |
| LHC | Lumped Heat Capacity analysis, beräkningsmodell för att beräkna temperatur för en kropp i ett strömmande medium |
| LSO | Lag (2003:778) om Skydd mot Olyckor |
| FEM | Finite Element Method |
| TNT | Sprängämne. Används som synonym för ”trotyl” |
| Målområde | Område vid ett skjutfält som används som träffpunkt vid avfyrning av granater |

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inledning..... | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Syfte och mål..... | 2 |
| 1.3 | Avgränsningar..... | 2 |
| 1.4 | Metod..... | 2 |
| 1.4.1 | Litteraturstudie..... | 2 |
| 1.4.2 | Platsbesök | 3 |
| 1.4.3 | Beräkningar (inklusive val av beräkningsmodeller)..... | 3 |
| 1.5 | Parallella processer..... | 3 |
| 2 | Litteraturstudie..... | 5 |
| 2.1 | Brandutsatt ammunition | 5 |
| 2.1.1 | Fjällgren & Löfberg (2016) | 5 |
| 2.1.2 | Skriudalen, Fykse & Dullum (2009) | 5 |
| 2.1.3 | Edlund (1999) | 6 |
| 2.1.4 | Reflektion kring brandutsatt ammunition | 7 |
| 2.2 | Skogsbrand..... | 8 |
| 2.2.1 | Beadle (1940)..... | 8 |
| 2.2.2 | Bailey & Anderson (1980)..... | 8 |
| 2.2.3 | Santín, Doerr, Merino, Bryant & Neil (2016) | 9 |
| 2.2.4 | Taylor, Wotton, Alexander & Dalrymple (2004)..... | 9 |
| 2.2.5 | Weber, Gill, Lyons, Moore, Bradstock & Mercer (1995)..... | 10 |
| 2.2.6 | Butler (2010)..... | 10 |
| 3 | Skjutfältsbeskrivning..... | 11 |
| 3.1 | Beskrivning av målområde | 11 |
| 3.2 | Geologi | 11 |
| 3.3 | Vegetation | 11 |
| 3.4 | Natura 2000 område..... | 12 |
| 4 | Teori..... | 13 |
| 4.1 | Skogsbrand..... | 13 |
| 4.2 | Fenomenet kronbrand..... | 14 |
| 4.2.1 | Beteende för passiv kronbrand | 14 |
| 4.2.2 | Beteende för aktiv kronbrand..... | 14 |
| 4.2.3 | Beteende för självständig kronbrand..... | 15 |
| 4.3 | Värmetransport | 15 |
| 4.3.1 | Lumped heat capacity (LHC) analysis..... | 15 |
| 4.3.2 | Numerisk beräkningsmodell..... | 17 |

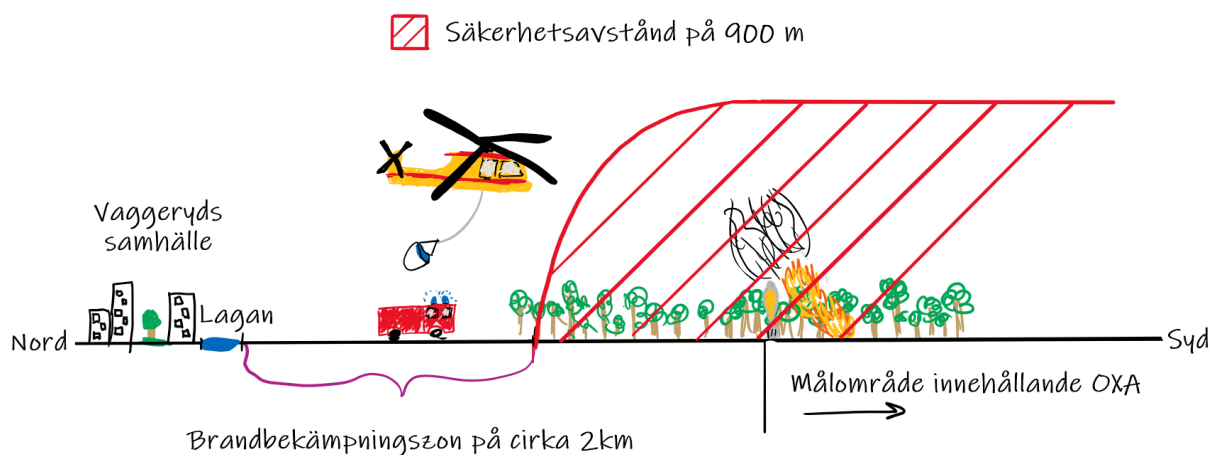
| | | |
|-------|---|----|
| 4.3.3 | Biots tal..... | 18 |
| 4.4 | Förbränningsteori..... | 19 |
| 4.5 | Osäkerheter..... | 20 |
| 5 | Modellerad brand..... | 21 |
| 5.1 | Brandens temperatur-tid kurva..... | 21 |
| 5.2 | Markegenskaper..... | 22 |
| 5.3 | Ammunitionsegenskaper..... | 23 |
| 5.4 | Modellering av värmetransport..... | 24 |
| 5.4.1 | Under markytan..... | 25 |
| 5.4.2 | Ovan markytan..... | 26 |
| 5.5 | Hantering av osäkerheter..... | 26 |
| 5.5.1 | Numerisk värmeberäkning..... | 26 |
| 5.5.2 | Lumped heat capacity analysis..... | 27 |
| 6 | Resultat..... | 29 |
| 6.1 | Under markytan..... | 29 |
| 6.1.1 | Marktemperatur..... | 29 |
| 6.1.2 | Granattemperatur..... | 33 |
| 6.2 | Ovan markytan..... | 35 |
| 6.3 | Känslighetsanalys..... | 36 |
| 6.3.1 | Under mark..... | 36 |
| 6.3.2 | Ovan mark..... | 37 |
| 7 | Diskussion..... | 39 |
| 8 | Slutsats..... | 43 |
| 9 | Framtida forskning..... | 45 |
| 9.1 | Fullskalig undersökning av skogsbrand..... | 45 |
| 9.2 | Detaljerad beräkningsmodell..... | 45 |
| 9.3 | Kostnad-nytta analys för förebyggande åtgärder..... | 45 |
| | Källor..... | 47 |
| | Bilaga A – Verifikation av termisk tunnhet..... | 1 |
| | Bilaga B – Datorprogram..... | 3 |
| | Bilaga C – Lumped Heat Capacity Analysis..... | 5 |
| | Bilaga D – Jämförelse med byggnadsmaterial..... | 9 |
| | Bilaga E – Jämförelse med annan värmetransportmodell..... | 11 |
| | Bilaga F – Kartor..... | 13 |

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Lokaliserat söder om Vaggeryd ligger ett av Försvarsmaktens skjutfält, Skillingaryds skjutfält. Vid skjutfältet har det i olika former bedrivits verksamhet sedan 1898. Skjutfältets målområde är cirka 350 hektar och har bedömts innehålla en betydande mängd OXA (OeXploderad Ammunition). OXA definieras enligt Försvarsmakten (2019) som ammunition som efter skjutning, tändning, kast, läggning eller fällning oavsiktligt inte har exploderat.

I händelse av en utbruten skogs- eller markbrand inom målområdet inrättas idag räddningstjänsten vid Vaggeryd kommun tillsammans med Försvarsmakten ett säkerhetsavstånd på 900 meter från målområdets yttre gräns för räddningstjänstens personal, vilket får två konsekvenser: 1) Branden tillåts växa okontrollerat vilket resulterar i en bredare brandfront samt ett större brandpåverkat område. Ett större brandpåverkat område medför risk för mer värmepåverkad OXA. 2) Minskad brandbekämpningszon innan branden når Vaggeryds samhälle, detta avstånd är idag cirka 2 kilometer. En mindre brandbekämpningszon innebär mindre marginaler vid en brandbekämpningsinsats. Situationen illustreras i figur 1, observera väderstrecken. Detaljerat kartmaterial finns presenterat i Bilaga F – Kartor. Informationen är hämtad från David Högberg, Stf Räddningschef vid räddningstjänsten i Vaggeryds kommun.



Figur 1. Illustration över rådande förutsättningar för brandbekämpning vid skjutfältet.

Traditionellt bekämpas skogsbränder så tidigt som möjligt för att förhindra spridning och begränsa påverkad areal, något som i dagsläget ej är möjligt vid skjutfältet. En anledning är att säkerhetsområdet medför att helikoptrar/flygplan inte får flyga över OXA området, se figur 1, vilket försvårar vattenbombning. Dessutom är arbetsmiljön för brandbekämpande personal riskfylld och omfattande skyddsutrustning krävs för att beträda området vid en brand, exempelvis en splitterskyddad traktor eller liknande. Efterarbetet av att röja området med potentiellt värmepåverkad OXA ses också som en stor utmaning. På grund av områdets komplexitet samt brandens obehindrade framfart, krävs en omfattande gemensam insats från kommunal räddningstjänst och Försvarsmakten vid och efter en brand.

Med rådande förutsättningar ligger det i alla inblandade aktörers intresse att belysa de faktiska riskerna med brandutsatt OXA och undersöka dess beteende. Situationen väcker ett antal frågor. Vad för sorters OXA finns det vid Skillingaryds skjutfält? Hur påverkas ammunition av att ligga ute, såväl över som under mark, under en längre tid? Hur sker värmeöverföringen från en brand till OXA:n? Hur förändras värmetransporten vid olika djup i marken och vid bränder med varierande varaktighet och intensitet? Vid vilka temperaturer förekommer det en faktisk risk för explosion?

1.2 Syfte och mål

Syftet med arbetet var att undersöka hur en skogsbrand vid Skillingaryds skjutfält hade påverkat befintlig OXA och om det föreligger risk för termisk antändning av dess explosivämne.

Målet med arbetet var att analysera OXA:s beteende vid brandexponering och förstå hur värmetransporten sker när den utsätts för brand. Förståelsen skapades genom att genomföra värmebalansberäkningar för brandexponerad OXA. Ytterligare ett mål med arbetet var att skapa ett underlag för räddningstjänsten i Vaggeryd för deras fortsatta arbete med insatsplanering vid Skillingaryds skjutfält.

1.3 Avgränsningar

Alla händelser och konsekvenser efter att OXA deflagrerat/detonerat på grund av värmexponering bortses från. Endast ammunition som har använts vid Skillingaryds skjutfält och som bedömdes att vara av intresse har inkluderats. Valet av intressant ammunition skedde tillsammans med Försvarmakten. Brandförlopp som ej ansågs vara realistiska för rådande förhållanden avgränsades bort. Glödbrand hanterades endast kvalitativt. Geografiskt har arbetet avgränsat till målområdet.

1.4 Metod

I kommande avsnitt presenteras metoderna som har använts vid arbetet. Utgångspunkten vid samtliga metodval och antagande har varit att använda ett realistiskt tillvägagångssätt för att vidhålla rimligheten i antaganden, beräkningar och resultat. Samtliga val och antagande ska medföra att systemet, i detta arbete OXA:n, blir påfrestat. Bakgrunden till metodvalet har sitt ursprung i arbetets syfte att undersöka hur en skogsbrand påverkar befintlig OXA. Vid de tillfällen osäkerheter kring indata existerat har det i största möjliga mån använts statistiska fördelningar eller flera källor.

1.4.1 Litteraturstudie

Som första moment för arbetet genomfördes en litteraturstudie med två syften som vardera fokuserade på ett specifikt litteraturområde. Det första syftet var att kartlägga kunskapsläget gällande brandutsatt OXA/ammunition. Det andra syftet var att förstå hur en skogsbrand påverkar dess omgivning, och faktorer som avsågs att undersökas var brandtemperatur och värmetransport i mark.

Litteraturstudien för det första syftet genomfördes med en bred infallsvinkel, information hämtades från flera källor, till exempel databaser, akademiska publikationssamlingar och kontakt med lämpliga myndigheter, se tabell 1. För artiklar gällande brandutsatt OXA användes olika kombinationer och synonymer av sökorden OXA, skogsbrand, brand, värmexponering, upphettning och temperatur. Engelska motsvarigheterna som användes var UXO, UO, UXB, ERW, ammunition, forest fire, wildland fire, heat exposure och temperature.

Tabell 1. Informationskällor som användes vid litteraturstudie kring brandexponerad OXA.

| Databaser | Myndigheter och företag |
|-------------------|-------------------------|
| Scencedirect | SWEDEC (Försvarmakten) |
| FHS Publikationer | Fortifikationsverket |
| FOI | MSB |
| LTU publikationer | Försvarets materielverk |
| LUBsearch | Polisen |
| NFPA | |
| NIST | |
| SAGE | |
| Springer | |
| Utkiken.net | |

När information hämtades från myndighet med ej tillgängligt onlinearkiv förklarades arbetets syfte, mål och avgränsningar. Det var sedan myndigheten som försåg arbetet med utvald litteratur.

Vid val av lämpliga artiklar rörande enbart skogsbrand användes två kriterier för selektering: 1) Försöken som artiklarna baserades på skulle vara i stor skala. Detta medförde att alla artiklar baserade på mindre laboratorieförsök eller liknande selekterades bort. Det bedömdes att resultatet från mindre försök inte var applicerbara för vad informationen i artiklarna senare skulle användas till. 2) Vegetationens storlek och omfång skulle vara likt eller snarlikt rådande förhållande vid Skillingaryds skjutfält. Databasen som användes för sökning av enbart skogsbrandsrelaterade artiklar var LUBSearch. Sökorden som användes var kombinationer av temperature, heat exposure, convection, radiation och forest fire/wildland fire. Motsvarande sökord användes också på svenska. När en artikel av intresse hittades granskades även dess referenslista för att hitta ytterligare relevanta artiklar. Baserade på dessa artiklar designades sedan en brandkurva.

Sammanfattningsvis blev det totalt 9 artiklar som inkluderades i litteraturstudien, tre berörde värmexponerad ammunition, en berörde hur fukthalt i marken påverkar värmetransport, tre berörde temperatur under ett skogsbrandförlopp samt en berörde värmetransportskoefficient vid skogsbrand.

1.4.2 Platsbesök

För att förstå förutsättningarna vid Skillingaryds skjutfält genomfördes ett platsbesök tillsammans med Jonas Wassborg, skjutfältschef vid Skillingaryds skjutfält, och David Högberg, stf. räddningschef vid räddningstjänsten i Vaggeryds kommun. Platsbesöket genomfördes den 17 november 2019. Baserat på den information som erhöles vid platsbesöket beskrivs skjutfältet i kapitel 3.

1.4.3 Beräkningar (inklusive val av beräkningsmodeller)

Initialt valdes beräkningsprogrammet HSLAB utvecklat av FOA 1990 för värmetransport i mark. Programmet gick dock ej att starta på grund av dess ålder. Istället utvecklades en endimensionell numerisk värmetransportsberäkning vilket genomfördes i Microsoft Excel Office 365 tillsammans med Palisade @Risk 7.6. @Risk användes för att hantera statistik spridning i indata. För beräkning av OXAs temperatur vid markytan användes ”lumped heat capacity analysis”.

Beräkningsmetoderna användes sedan för att beräkna temperaturen för valda granater vid brandexponering ovan och under markytan. Resultatet av beräkningarna analyserades och en känslighetsanalys genomfördes för att undersöka vilka variabler som påverkade resultatet mest. En mer detaljerad beskrivning av beräkningsmodellerna presenteras i kapitel 4 och beräkningsgången presenteras i kapitel 5.

1.5 Parallella processer

Parallellt med författande av detta examensarbete har räddningstjänsten vid Vaggeryds kommun återupprättat en dialog med Fortifikationsverket, Försvarmakten och Länsstyrelsen för att gemensamt komma fram till en bra lösning för brandrisksituationen vid skjutfältet. Det är räddningstjänstens förhoppning att få skjutfältet klassat som en så kallad LSO 2:4 anläggning, vilket skulle medföra att räddningstjänsten får möjlighet att ställa lagkrav på släckutrustning, beredskap vid skjutfältet samt förebyggande åtgärder som brandgator.

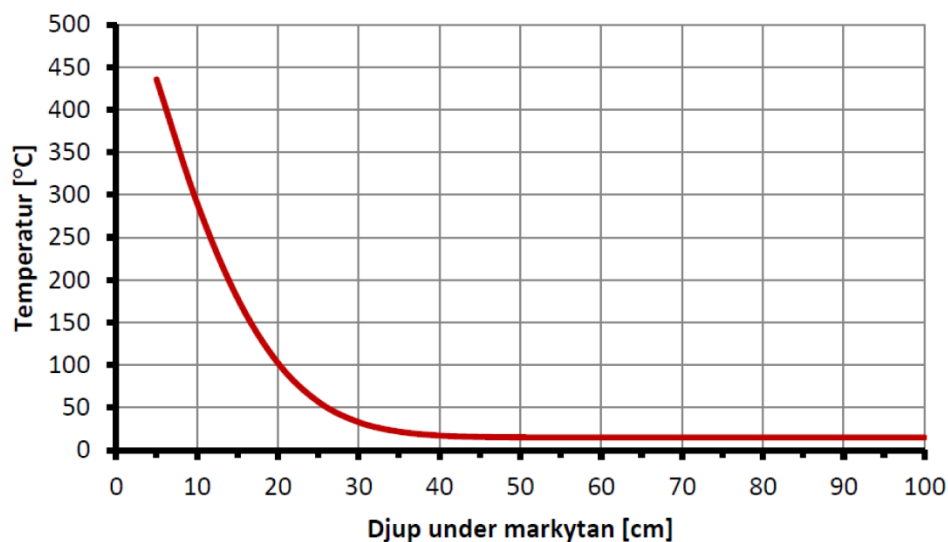
2 LITTERATURSTUDIE

I kommande kapitel presenteras artiklar om brandutsatt ammunition och skogsbrand. Artiklarna i avsnitt 2.1 avslutas med en kortare reflektion om kunskapsfronten idag. Artiklarna kommer senare i arbetet att användas som jämförelsematerial för arbetets beräknade resultat. Artiklarna som presenteras i avsnitt 2.2 kommer användas som utgångspunkt i valet av temperatur-tid kurva, denna presenteras i avsnitt 5.1. Artiklarna i avsnittet kommer också användas som diskussionsunderlag.

2.1 Brandutsatt ammunition

2.1.1 Fjällgren & Löfberg (2016)

På uppdrag av Fortifikationsverket genomförde Fjällgren och Löfberg (2016) vid SWEDEC en serie experiment för att utvärdera huruvida eldning eller grillning kan initiera OXA nere i marken. Försöken genomfördes genom eldning i en gammal oljetunna med en diameter på 60 centimeter. Termoelement grävdes ner i fuktig packad sand med 10 centimeters intervall ner till 60 centimeter under markplan. Försöken upprepades två gånger, vid ena tillfället användes kol som bränsle och vid det andra användes björkved. Högst uppmätt temperatur var ungefär 205 °C vid 10 centimeters djup efter cirka 19 timmars konstant eldning. Resultaten kompletterades av teoretiska beräkningar av värmeledning som erhöles från Linköpings universitet. Indata till beräkningen antog att markytan höll konstant temperatur på 600 °C under en timme. I figur 2 presenteras resultatet, detaljerad beskrivning av metod och indata finns i Fjällgren och Löfberg (2016).



Figur 2. Marktemperaturen vid en timme efter konstant exponering av 600 °C. Figuren ägs av Fjällgren & Löfgren vid Försvarsmakten/SWEDEC.

Utifrån försöken och beräkningen drogs slutsatserna att det ej föreligger en risk för initiering av OXA på djup under 20 centimeter. Vid djupintervallet 5–20 centimeter finns en risk för initiering av OXA och på ett djup mindre än 5 centimeter finns en betydande risk för initiering av OXA vid normal eldning. Slutsatserna innehåller en säkerhetsmarginal då rapporten plockades fram som underlag huruvida eldning/grillning på före detta skjutfält kunde initiera OXA.

2.1.2 Skriudalen, Fykse & Dullum (2009)

Skriudalen, Fykse och Dullum (2009) genomförde experiment för norska Forsvarets forskningsinstitut (FFI) som undersökte om ”multi purpose ammunition” av kaliber 12,7 millimeter och 20 millimeter kunde antändas av en engångsgrill. Experimenten genomfördes med ammunitionen i direkt kontakt med grillen och med ammunitionen skyddad av 1–2 centimeter jord. Experimenten upprepades med flera lokala jordsorter. Resultatet från försökserierna visade att testad ammunition exploderade efter att de utsatts för värmeexponering, detta inträffade i temperaturområdet 150–250 °C. Inom varje försökserie fanns det en

spridning av tid till explosion, exempelvis så exploderade ammunition för serien ”12,7 mm MP delvis nedsunket i jord” inom intervallet 25–65 minuter. Beroende på ammunition, jordart och om ammunition var placerad precis under engångsgrillen eller placerad med skyddande jordlager exploderade ammunition efter 10–92 minuter.

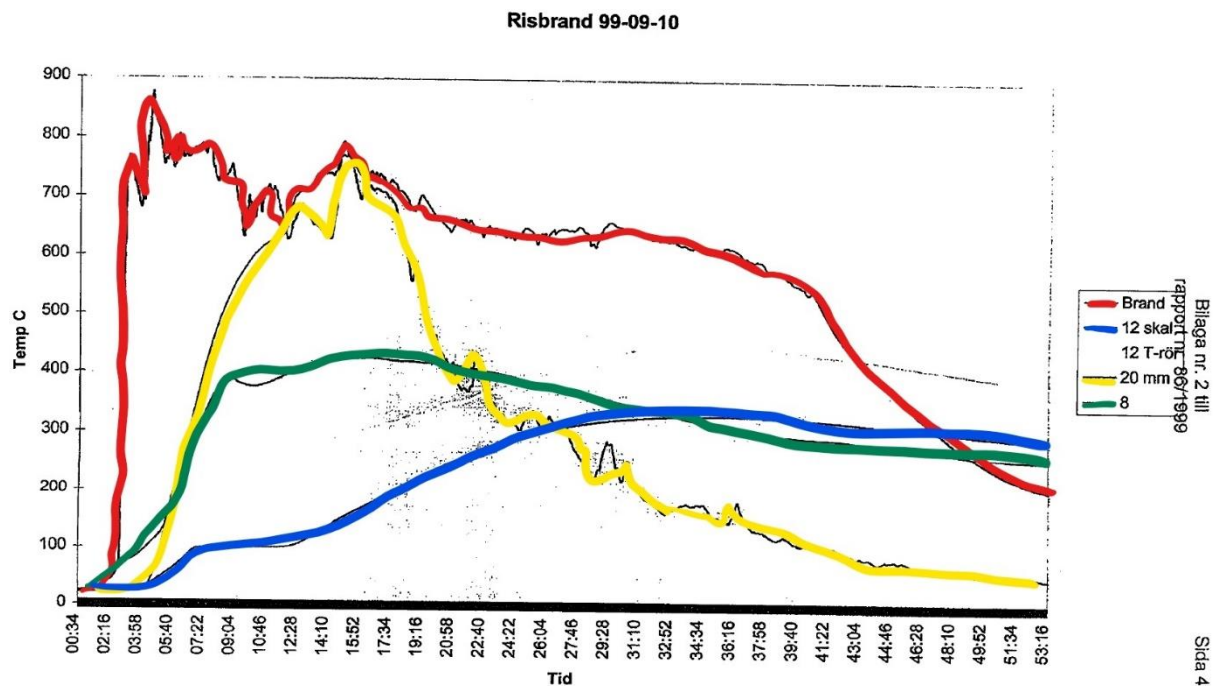
2.1.3 Edlund (1999)

Edlund (1999) genomförde två storskaliga experiment för att undersöka ”risker som föreligger och vilken tid som finns till förfogande för släckning av bränder på skjutfält där OXA kan förekomma”. Vid försöken användes totalt åtta sorters ammunition, bland annat SVINGGR 80, SVINGGR 120 och SGR 155. Experimenten genomfördes på en cirka 20 kvadratmeter grusplan som täcktes med 1–2 decimeter tjockt lager av ett år gammalt granris och grenar som därefter antändes. Försöksuppställningen bedömdes vara värsta fallet som kan förekomma på ett skjutfält utan att vara orealistiskt. Temperaturvariation över tid uppmättes med speciellt iordningsställda granatkroppar. Det genomfördes också prov med skarp ammunition. I tabell 2 presenteras en sammanställning av Edlunds resultat för SVINGGR 80 och SVINGGR 120.

Tabell 2. Tid till explosion (mm:ss) efter antändning för SVINGGR 80 och SVINGGR 120. Bearbetat resultat från Edlund (1999).

| Händelse | SVINGGR 80 | SVINGGR 120 |
|-----------|------------|-------------|
| Tändning | 00:00 | 00:00 |
| Öppen eld | - | 00:57 |
| 1:a smäll | 05:00 | 07:22 |
| 2:a smäll | 06:30 | 07:37 |
| 3:e smäll | 09:15 | 13:00 |
| Slut | 22:30 | 24:57 |

Resultatet från tabell 2 kompletteras av temperatur-tid kurvan som presenteras i figur 3. Figuren visar brandens temperaturvariation över försökstiden. Den visar också temperaturen för skalet på en 12 cm sprängvinggranat, 12 skal, samt temperaturen för samma granats tändrör, 12 T-rör. Vad 20 mm refererar till är antingen ammunition av typen 20/41 SLSGRM M/71 eller 20/41 SLBRHPGR 95. Den gröna linjen marked ”8” refererar till 8 cm sprängvinggranat.



Figur 3. Temperatur-tid kurva för brand samt SVINGGR 80 och SVINGGR 120. Färgkodningen av linjerna har gjorts av V. Arozenius. Bilden ägs av Försvarmakten/SWEDEC.

För SGR 155 tog det 9 minuter från antändning till ”smäll”. Brandkurvan vid det försöket var lite mindre aggressiv och temperatur började sjunka efter 16 minuter.

Edlund drog en rad slutsatser från experimenten. Den första slutsatsen var att främsta faktorn som påverkar risken för att OXA deflagrerar/detonerar är brandens beteende och förlopp. Faktorer som har mindre betydelse är ammunitionstypen, utförande och verkansformer. Den andra slutsatsen var att granater omsätts av värmeexponeringen, inte av att tändrör initieras av värmexponering. Detta förklarar Edlund med att tändämnen som användes för initiering, dvs i tändröret, har en högre antändningstemperatur än det verkande sprängämnet. I slutsatsen skriver Edlund (1999, s.4) två stycken av särskilt intresse för detta arbetet, det första är följande:

”I värsta fall kan OXA reagera genom deflagration inom 4–5 minuter efter ett område antänt och inom 2–3 minuter efter att branden är utvecklad (övertänd)”¹.

Och det andra stycket av intresse är:

”Även om brandens förlopp varit så snabbt att ingen reaktions erhållits, exempelvis vid en svepande gräsbrand, finns det anledning att vänta med att beträda området efter att branden med säkerhet slocknat. Orsaken är att en uppbettad granatkropp kan åstadkomma en succesiv smältning av sprängämnet och därmed en reaktion. Även om en OXA med delvis smält sprängämne inte deflagrerar så är känsligheten för slag och stötar betydligt förbörda så länge sprängämnet är i smält tillstånd.”

2.1.4 Reflektion kring brandutsatt ammunition

Samtliga tre rapporter drar slutsatser att det förekommer risk för oönskad detonation vid värmexponering. Mängden värme som slutsatserna baserades på skiljer sig avsevärt vilket är i linje med respektive rapports syfte. Fjällgren och Löfbergs metod baserades på värmeledning via jord från eldning i tunna, Skriudalen et al. från kontakt med engångsgrill och Edlund utifrån att ammunition placerades i en iscensatt skogsbrand. Det är också olika sorters ammunition som författarna har undersökt. En gemensam nämnare för samtliga är att ingen av dem placerade ammunition i fullskaliga skogsbrandsförhållanden. Edlunds försöksuppställning är i sammanhanget mest likt fullskaliga skogsbrandsförhållanden men i vissa avseenden för utmanande.

Sammanfattande så ger artiklarna en förståelse av brandutsatt ammunition men lämnar utrymme för mer detaljerade försök, beräkningar och experiment.

¹ Här måste Edlund (2009) syfta på 4–5 minuter för den specifika provuppställningen.

2.2 Skogsbrand

2.2.1 Beadle (1940)

Beadle (1940) genomförde experiment där temperaturen i jordlagret och olika djup uppmättes vid exponering från skogsbrand. Experimenten genomfördes i skog av träslaget eukalyptus i Australien. En serie organiska föreningar med kända smältpunkter grävdes ner i jordlagret (sand). Efter genomfört experiment grävdes sedan dessa upp och vilka ämnen som smält antecknades. I en av försökserierna undersöktes vattenhaltens påverkan på värmevågen. Två identiska försöksuppställningar användes där 9 kg eukalyptus trä från samma träd eldades på två 0,4 m² stora ytor. Den ena elden placerades på blöt jord (20% vattenhalt) och den andra på torr jord (6% vattenhalt). Resultatet från försökserien presenteras i tabell 3. Temperaturer som har ett efterföljande "T" uppmättes med kvicksilvertermometer.

Tabell 3. Marktemperatur beroende av djup och vattenhalt vid brandexponering. Djupen är omvandlade från inch till centimeter.

| Djup [cm] | Blöt jord [°C] | Torr jord [°C] |
|-----------|----------------|----------------|
| 2,54 | 132–135 | >250 |
| 5,08 | 95–105 | 109–111 |
| 10,16 | 57–59 | 90–95 |
| 15,24 | 34 T | 57–59 |
| 20,32 | 26 T | 43–50 |
| 25,4 | 22 T | 29 T |
| 30,48 | 20 T | 20 T |

Beadle poängterar att vatten som förångas diffunderar uppåt och transporteras inte neråt för att kondensera eftersom ingen förändring i vattenhalt observerades efter bränderna brunnit ut.

2.2.2 Bailey & Anderson (1980)

Bailey och Anderson (1980) genomförde experiment där brandtemperaturen uppmättes för bränder i tre olika vegetationer. Vegetationstyperna som användes var gräs (*eng: grass land*), buskskog (*eng: shrub land*) och skog (*eng: forest*). Träslaget i skogen var asp. Temperaturer uppmättes med pellets med olika smältpunkt. Pelletsen placerades på olik höjd i marken för att få ett samband med hur temperaturen varierade i förhållande till markytan. Experimenten visade att temperaturen från en gräsbrand blev lägre än den som utvecklades från buskskog och skog. Anledningen till att gräsbranden utvecklade en lägre temperatur var att det innehöll mindre bränsle per hektar samt att en mindre andel av bränslet var av energirikt trä. Resultatet visade också att temperaturen i huvudbranden (*eng: head fire*) var högre än motbranden² (*eng: back fire*). Resultatet från Bailey och Andersons forskning presenteras i tabell 4.

Tabell 4. Temperaturer för huvud- och motbrand vid markytan vid olika vegetationsbränder. Informationen är hämtad från Bailey & Anderson (1980)

| Medeltemperatur [°C] | Vegetationstyp | | |
|------------------------------|----------------|----------|---------|
| | Gräs | Buskskog | Skog |
| Huvudbrand | 206±12* | 435±17* | 430±29* |
| Motbrand | 137±9* | 325±19* | 228±32* |
| Temperaturomfång [°C] | | | |
| Huvudbrand | 93–427 | 232–704 | 260–982 |
| Motbrand | 93–232 | 204–427 | 93–371 |

*Medel ± standardavvikelse

² En motbrand är en brand som startas i motsatt riktning för att förbränna material innan huvudbranden anländer (USDA Forest Service, u.d.).

2.2.3 Santín, Doerr, Merino, Bryant & Neil (2016)

Som en del i *Canadian Boreal Community FireSmart Project* brändes 2012 skog för att undersöka hur kemiska förhållande i marken påverkades av en skogsbrand (Santín, Doerr, Merino, Bryant, & Neil, 2016). Skogen i vilken experimentet genomfördes hade vuxit fritt sedan en tidigare skogsbrand 1931 och bestod av tallar med en medelhöjd på 14 meter. Jordarten bestod av morän med ett övre organiskt jordlager. Temperaturen loggades med termoelement placerade vid markytan. Dessa var placerades med två meters mellanrum i tre rader. Varje rad var 18 meter lång och innehöll nio termoelement. Raderna placerades 7,5 meter ifrån varandra. Branden startades som en brandfront med en eldkastare och utvecklades till en kronbrand med ungefärlig effektutveckling per meter brandfront på cirka 8 MW/m, flambhöjd på 5–6 meter och spridningshastighet på 6–7 meter per minut. Vid markytan tog det mellan 50 till 200 sekunder för temperaturen att stiga till T_{Max} från 40 °C och avsvälning tog 500 till över 2000 sekunder. T_{Max} var den högst uppmätta temperaturen för varje termoelement.

Resultatet från experimentet innehöll en stor spridning av maxtemperatur vid olika mätpunkter samt hur temperaturen varierande över tid. Medelvärdet för högsta temperaturen, T_{Max} , var 745 °C och intervallet var 550–976 °C. En sammanställning av Santín et al. experiment presenteras i tabell 5. Tabellen visar hur lång tid temperaturen översteg ett visst gränsvärde. Exempelvis visade deras försök att i genomsnitt så översteg temperaturen 700 grader i 21 sekunder, men omfånget var från 0-72 sekunder.

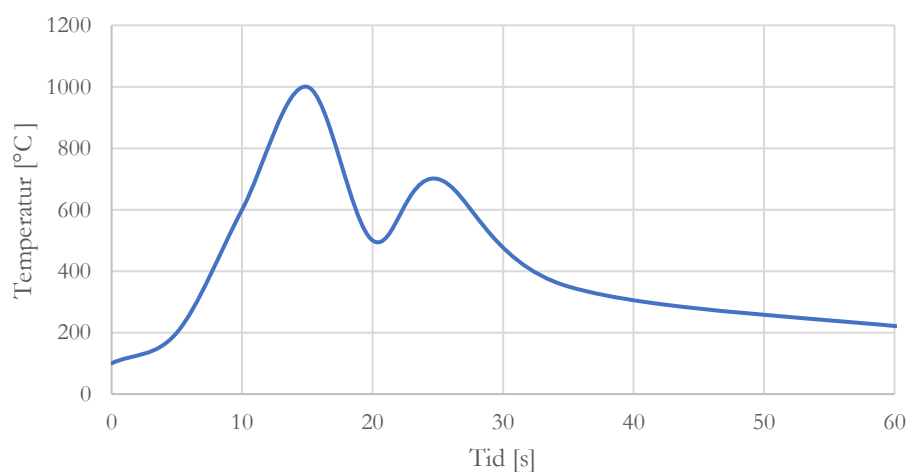
Tabell 5. Varaktighet för överstigande av ett visst temperaturregränsvärde. Informationen är hämtad från Santín et al. (2016)

| | Medelvärde [s] | Omfång [s] |
|---------------|----------------|------------|
| Tid $T > 300$ | 180 | 65–364 |
| Tid $T > 500$ | 81 | 24–176 |
| Tid $T > 700$ | 21 | 0–72 |

2.2.4 Taylor, Wotton, Alexander & Dalrymple (2004)

I samma område i Kanada som Santín et al. (2016) nyttjade har flera storskaliga försök genomförts. Taylor, Wotton, Alexander och Dalrymple (2004) sammanställde resultatet från nio fullskaliga försök där vindpåverkan på brandfrontens hastighet och varaktighet undersöktes. Samtliga försök genomfördes under juni och juli månad under åren 1997–2000. Utöver vindhastighet mättes också temperaturen i marknivå. Resultatet från sammanställningen visar att medeltemperaturen inom intervallet 0,01–1,5 meter ovan marknivå var 1195 ± 48 °C. Deras resultat visar att temperaturen vid markytan översteg 500 °C i snitt 74 sekunder för samtliga försök. Resultatet sammanställdes också till en typisk tid-temperaturkurva, se figur 4.

Typisk temperatur-tid kurva



Figur 4. Typisk temperaturtid kurva i marknivå från Taylor et al. (2004). Materialet är bearbetat av V. Arozenius.

2.2.5 Weber, Gill, Lyons, Moore, Bradstock & Mercer (1995)

Weber, Gill, Lyons, Moore, Bradstock och Mercer (1995) presenterade en modell där data från bränder i Ku-ring-gai Chase National Park, Sydney användes för att kalibrera en ”tre-steps-modell”, likt McCaffrey’s (1979) plymmodell, som baserades på klassiskt turbulent plymteori. Modellen inkluderade temperatur i bränslebädden samt flammans temperatur. Weber et al. poängterade tyvärr att modellen inte var tillräckligt kalibrerad för att beräkna temperaturen för en skogsbrand, utan kunde alltså endast användas för att analysera genomförda experiment.

2.2.6 Butler (2010)

Butler (2010) analyserade data som samlades in vid ”the international crown fire modeling experiment” som genomfördes 1999. Syftet var att undersöka storlek och varaktighet för konvektionsöverföring från fullskalig kronbrand. Vid experimenten användes utrustning som loggade bland annat temperatur, hastighet och infallande strålning. Resultatet visade att vertikala vindhastigheter 9 meter ovan mark kan nå 15 m/s. I samma försöksserie beräknades också konvektionstalet 9 meter ovan markytan, vilket maximalt blev 120 W/m²K. Vid länge exponeringstider (20 till 40 s) mot sensorn var konvektionstalet inom intervallet 30 till 50 W/m²K.

3 SKJUTFÄLTSBESKRIVNING

Skillingaryds skjutfält är ett militärt övnings- och skjutfält som sträcker sig parallellt med E4:an i höjd med Skillingaryd, Småland. Skjutfältet är cirka 13 km långt (N-S), 4 km brett (Ö-V) och utgör ett område på cirka 35 km². Precis som alla övriga Sveriges skjutfält ägs området av Fortifikationsverket och hyrs ut till Försvarsmakten. Idag är ansvarigt regemente Göta ingenjöreregemente Ing 2, Eksjö men skjutfältet är en övningsplats för fler regementen (SMHS, u.d.). Sedan skjutfältet inrättades 1898 har det bedrivits olika former av verksamhet, till exempel var Artilleriskjutskolan förlagd vid skjutfältet fram till flytt 1948. Den sista granaten avfyrades vid skjutfältet 2010 och den ammunition som ligger i skog och mark blir då yngst 9 år gammal och äldst upp mot 120 år gammal.

3.1 Beskrivning av målområde

Målområdet det vill säga det område som har använts som nedslagsområde för granater vid övning är lokaliserat i de norra delarna av skjutfältet, se karta i Bilaga F – Kartor. Det har gjorts en bedömning att det finns en ansenlig mängd OXA inom målområdet och därför råder det tillträdesförbud enligt Skyddslag 2010:305. Målområdet har en area på 350 hektar och varierande topografi. I de södra delarna finns ett hedområde och i den norra delen är området kuperat med varierande skog och lägre vegetation. Genom området går det smalare bilvägar.

Vid platsbesök tillsammans med skjutfältschef Jonas Wassborg framgick det att hedområdet i de södra delarna av målområdet med största sannolikhet inte innehöll samma mängder OXA som det norra. Anledningen till detta var framförallt vegetationsskillnaden mellan de två områdena. I de södra delarna, det vill säga i hedområdet, möjliggör vegetationen snabbare och effektivare detektering av OXA. I de tätare skogspartierna i norr reduceras sökhastigheten och därför kan inte samma areal genomsökas per röjningstillfälle. Det är också så att hedområdet har använts oftare och därför har ammunitionsröjning genomförts mer frekvent.

Det sker regelbunden röjning av OXA inom målområdet men det är ett tidskrävande uppdrag. De vanligast förekommande ammunitionstyperna är artillerigranater av kaliber 10,5 och 15,5 centimeter samt sprängvinggranat av kaliber 8 och 12 centimeter och därmed utgör de den största risken. Vid ammunitionsröjning av ett område finns det alltid en risk att ammunition finns kvar trots att markytan är rensad, på grund av att tjällyft höjer upp ammunition. Detta medför att ett område som för 5 år sedan genomsöktes och bedömdes vara fritt från ammunition kan idag var fullt med synlig OXA/ammunitionsskrot.

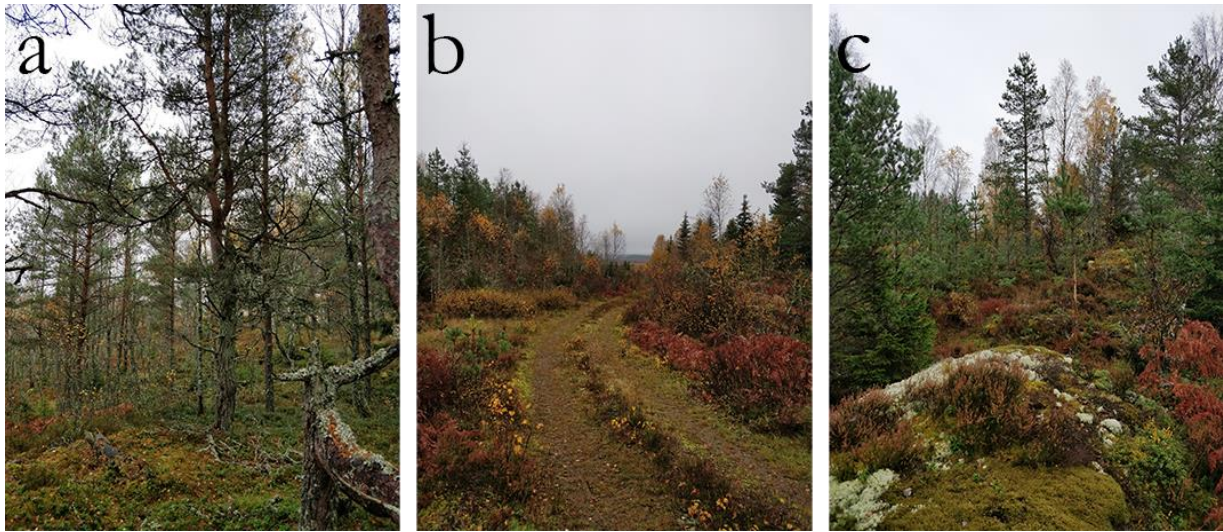
3.2 Geologi

Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, är den svenska myndighet som har till uppgift att tillhandahålla geologisk information. I SGU:s (2019) kartjänst ”jordarter 1:1 miljon” går att det avläsa dominerande jordarter i markytan vid målområdet. Den mest förekommande jordarten är morän, i de sydvästra delarna finns det isälvsediment. Det översta lagret i isälvsedimentet är sand. SGU (2019) tillhandahåller också jorddjup, två relevanta provborrningar har genomförts vid området, båda dessa visar att det övre jordlagret är minst en meter djupt.

3.3 Vegetation

Vegetationen i målområdet har kraftigt formats av regelbunden beskjutning med efterföljande detonationer och bränder. Detta är viktigt att veta när vegetationen beskrivs då området har formats efter rådande omständigheterna. Vid platsbesök 2019-10-17 observerades det att många träd skadats av beskjutning och tvingats återhämta sig från skador som uppstått. De trädslag som detta framförallt observerades på var gran och tall. De högsta träden var framförallt barrskog, dess höjd uppskattades till ungefär 20 meter. Trädstammarnas diameter för de grövsta träden uppskattades till ungefär 3 decimeter. Insprängt bland barrträden fanns det också lövskog, framförallt björk. Majoriteten av dessa träd var mindre än barrträden, med några få undantag. Detta kan förklaras med att lövträd lättare antänds vid en skogsbrand, något som målområdet drabbats av regelbundet under dess aktiva period. Efter 2010 har skogen i målområdet har fått

växa ostört, vilket syns i vegetationen när den jämförs med områden inom skjutfältet som inte har beskjutits. Vid markytan växte mindre barr- och lövträd, buskar, ormbunkar, ris och mossa. I figur 5a-c presenteras bilder tagna vid platsbesöket. Vad som inte framgår av bilderna är att det fanns områden med lite tätare skog.

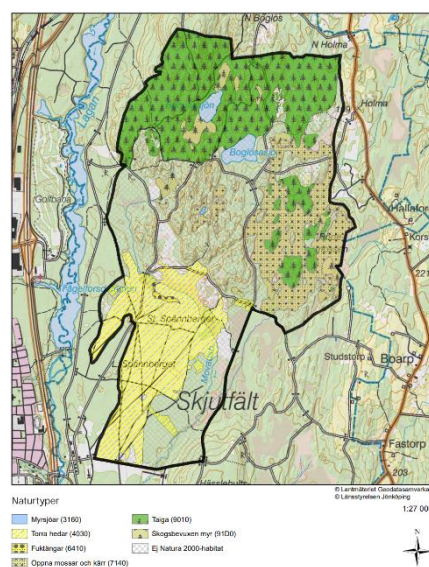


Figur 5. Bilder från målområdet. Fotografier tagna 2019-10-17 av V. Arozenius. a) T.h. syns skadat träd från beskjutning. b) Skogsväg upp till bockvärnet. c) Klippställ samt blandat barr- och lövskog.

3.4 Natura 2000 område

Natura 2000 områden är utpekade områden som tilldelas extra skydd för att förhindra att särskilda växter och djurarter utrotas i enlighet med EU:s fågeldirektiv samt art- och habitatdirektiv (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2016). Genom att genomföra utpekanden åtar sig landet långsiktigt att ta vara på djur och natur. För verksamheter, åtgärder inom området eller i anslutning som kan komma att påverka området krävs särskilt tillstånd (Länsstyrelsen i Jönköpings län, 2016).

Stora delar av skjutfältet blev 2005 utpekade som ett Natura 2000 område. I den tillhörande bevarandeplanen från Länsstyrelsen i Jönköpings län (2016) framgår det att myrsjöar, torra hedar, fuktängar, öppna mossar och kärr, taiga samt skogbevuxen myr ska skyddas. Utöver skyddsvärd vegetation finns det utpekade djurarter som ska skyddas, dessa är citronfläckad kärrtrollslända och sju olika fågelarter. Bevarandeområdets gränser framgår i figur 6.

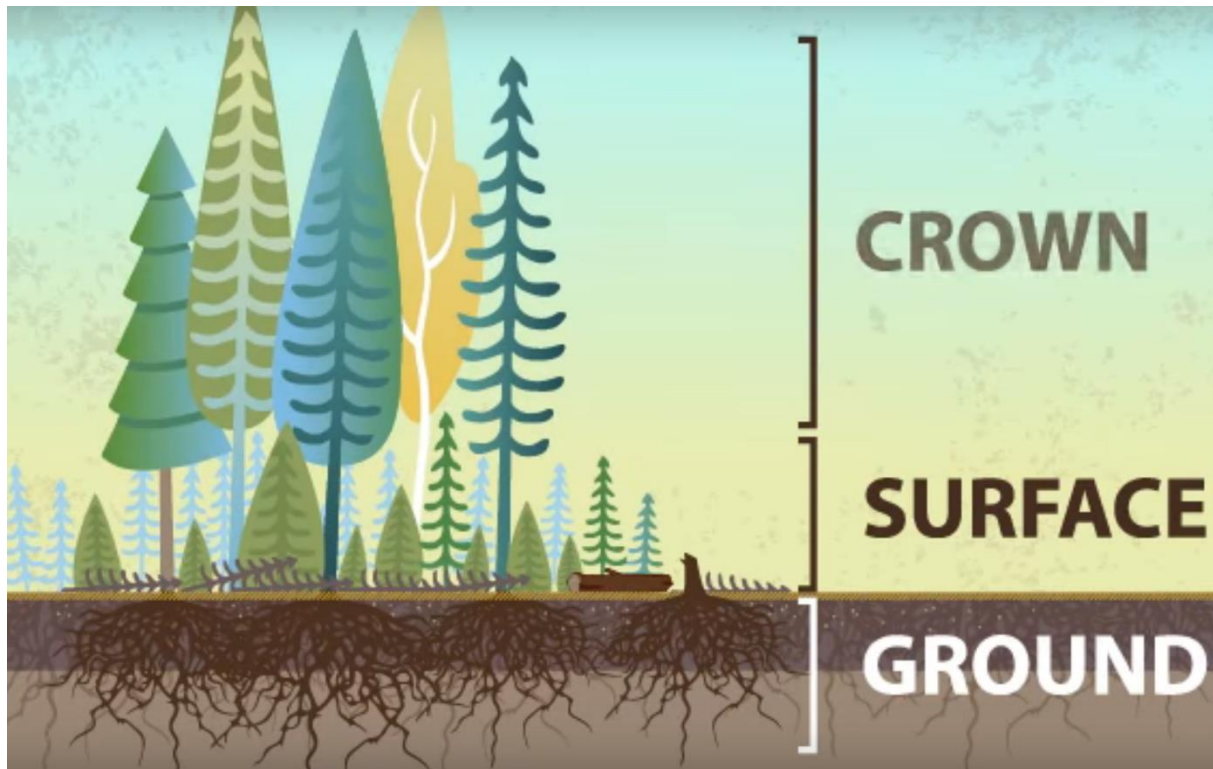


Figur 6. Karta över Skillingaryds Natura 2000 område. Bilden ägs av Länsstyrelsen i Jönköping län.

4 TEORI

4.1 Skogsbrand

Skogsbränder delas upp i tre olika typer: glödbrand i mark (*eng: ground fire*), ytbrand (*eng: surface fire*) och kronbrand (*eng: crown fire*) (Weise, Cobian-Iñiguez, & Princevac, 2018). Beroende på lokala förhållanden så som fukthalt, bränsletyp, bränslefördelning och trädhöjd kan de tre typerna brinna beroende eller oberoende av varandra. Likt förbränningstriangeln som innehåller bränsle, syre och värme finns det en triangel för skogsbränder. Denna innehåller faktorerna som är viktiga för en skogsbrands beteende, vilket är bränsle, väder och topografi (Heward, 2019). Figur 7 visar en schematisk uppdelning av de tre skogsbrandstyperna.



Figur 7. Bild över skogsbrandstyper: glödbbrand i mark, ytbrand och kronbrand. Bilden ägs av Thode & Hunter (2016).

Glödbränder i mark kan uppstå när det har ackumulerats brännbart material under markytan som sedan antänds (Reardon, 2019). Bränslet består av halv- eller helnedbrutet organiskt material som trädstammar, löv, grenar och organiska jordarter. Glödbränder startas oftast av blixtnedslag eller mänsklig aktivitet. En glödbbrand nere i marken kan spridas och utvecklas till en ytbrand. Ytbränder kan också starta glödbränder i marken, oavsett spridningsriktning så kan brandtyperna fortsätta brinna utan den andres inverkan. Dessutom kan ytbränder passera ovanpå jordlagret utan att glödbbrand startar, förutsatt att det övre bränslets vatteninnehåll är mycket lägre än det undre. Glödbränder kännetecknas av deras väldigt långsamma förbränningshastighet kring 1–3 cm/h och förhållandevis låga förbränningstemperatur på ungefär 500–700 °C.

Ytbränder förbränner det bränsle som finns tillgängliga på markytan. Bränslet kan vara gräs, mossa, mindre vegetation och liggande träd. Skogsgolvet kan delas upp i tre lager (Paysen et al., 2000), det översta lagret består av färskare organiskt material, i engelsk litteratur benämns detta lager som skogsskräp (*eng: forest litter* eller *litter layer*). Det andra lagret benämns som fermenterat lager (*eng: fermentation layer*), i detta har det organiska materialet börjat brytas ner av mikrobiell aktivitet. Det understa lagret kallas humuslagret (*eng: humus layer*), här har organiska nedbrytningen fortsatt ytterligare. Ytbränder där bränslet till stor del utgörs av grövre material så som skogsskräp (*eng: timber litter*) sprids väldigt långsamt även om det är mycket torrt (Scott & Robert, 2005, s. 11).

Skogsbränder som brinner i trädkronor är generellt bränder med två nivåer där det undre förser det övre med energi så att förbränning kan fortgå (Weise, Cobian-Iñiguez, & Princevac, 2018). Att det undre lagret kan antända det övre beror på värmetransport via konvektion och strålning. När temperaturen i kronan överstiger en kritisk temperatur sker antändning. Tid till antändning är beroende av ytbrandens intensitet, trädkronans kritiska antändningstemperatur och avståndet mellan ytbranden och trädkronan. Ytbrandens intensitet är en funktion av bränslets energiinnehåll, massavbrinningen och hastigheten som branden sprider sig med (Byram, 1959). Trädkronor med en högre densitet medför att brandgaser passerar långsammare genom trädkronan, detta genererar en snabbare uppvärmning på grund av den ökade värmetransporten via konvektionen mellan brandgaserna och bränslet. Fuktkvoten i trädkronan påverkar också antändningstiden, en högre fuktkvot gör att temperaturen för antändning stiger och därmed fördröjer tiden till antändning.

4.2 Fenomenet kronbrand

För att förstå om en ytbrand kan sprida sig till trädkronorna kan en kronspredningsmodell användas. En elementär sådan är Van Wagners (1977) modell där resultatet talar om två saker: 1) Om ytbranden är tillräckligt intensiv för att antända trädkronorna. 2) Kronbrandens förväntade beteende i förhållande till ytbranden. Kronbrändernas beteende delas upp i tre kategorier: passiv kronbrand (*eng: passive crown fire*), aktiv kronbrand (*eng: active crown fire*) och självständig kronbrand (*eng: independent crown fire*). Följande lista är hämtad från Van Wagner (1977) och är en sammanfattning av hur resultatet från hans beräkningsmodell ska tolkas.³ Detta ligger sedan till grund för förväntat beteende för branden. Listan kompletteras sedan med en beskrivning av varje scenario, dessa presenteras i avsnitt 4.2.1–4.2.3.

1. En passiv kronbrand kan uppstå förutsatt att
 - a. Ytbrandens intensitet, I , väsentligt överstiger den kritiska ytbrandens intensitet för kronbrand, I_0 ,
 - b. Spridningshastighet, R , förblir lägre än den kritiska spridningshastigheten, R_0 .
2. En aktiv kronbrand kan uppstå förutsatt att
 - a. I överstiger I_0 och
 - b. R överstiger R_0 .
3. En självständig kronbrand kan uppstå förutsatt att
 - a. I överstiger I_0 ,
 - b. R överstiger R_0 och
 - c. Kritisk infallande strålning, E_0 , tillförs självständigt från branden i trädkronan.

4.2.1 Beteende för passiv kronbrand

Passiv kronbrand uppstår vid två brandförhållanden. Det första förhållandet inträffar när höjden till trädkronan är väldigt låg vilket medför att kritisk brandsintensitet utvecklas vid låga flamspridningshastigheter. Detta förstärker massflödet till kronan långt före den kritiska spridningshastigheten är uppnådd. Det andra brandförhållandet är om kronlagret har låg bulkdensitet, dvs. innehåller lite bränsle. Vid dessa förhållanden kan ytbranden förbränna kronan utan att det sker någon spridning kronor emellan. Resultatet av detta blir bränder som är helt beroende av ytbrandens tillförsel av både energi och brännbara gaser.

4.2.2 Beteende för aktiv kronbrand

Ett grundläggande villkor för att en aktiv kronbrand ska uppstå är att ytbranden och kronbranden har samma flamspridningshastighet och därmed färdas som en enhet. Kronbranden är självförsörjande gällande bränsle men är beroende av ytbranden för att uppnå antändningsenergi. Ytbranden är i sin tur beroende av kronbranden för att utveckla en kontinuerlig flamfront genom att värma (främst genom strålning) framför brandfronten. En aktiv kronbrand är mest trolig att uppstå i en skog där följande förhållanden råder (a) ytbränsle som tillåter en ansevärd ytbrand, (b) en kronhöjd tämligen högt ovan marken och (c) ett sammanhängande kronlager av måttlig till hög bulkdensitet och låg till normal fukthalt i bladverket.

³ För komplett beräkningsmetod hänvisas läsaren till Van Wagners artikel.

4.2.3 Beteende för självständig kronbrand

En självständig kronbrand uppstår när alla kriterier för en aktiv kronbrand uppfylls samt att branden självständigt klarar av att tillföra den kritiska värmefluxen, E_0 . Vid ett sådant tillfälle är kronbranden inte längre beroende av ytbranden och kan därför spridas oberoende av ytbrandens flamfront. Vid vilka förhållanden detta kan ske är inte helt kartlagt. Thomas (1967) presenterar en teori där värmeflödet sker då flammen lutar och på så sätt tillför mer energi jämfört med en helt vertikal flamma. Teorin är starkt beroende av vindhastighet för att få flammen att luta. Frandsen (1971) presenterar en mer komplex teori om en framåtlutande brandfront men landar i samma slutsats som Thomas att tillståndet är starkt beroende av vindförhållanden.

4.3 Värmetransport

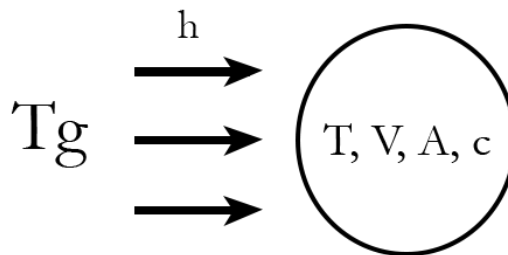
I kommande avsnitt presenteras teorin för två värmetransportmodeller samt hur både är beroende av Biots tal. Modellerna kommer senare användas för att beräkna temperaturen för brandutsatta granater.

4.3.1 Lumped heat capacity (LHC) analysis

Förutsatt att Biots tal är mindre 0,1 (detta presenteras detaljerat i avsnitt 4.3.3) kan en kropps temperatur beaktas som enhetligt. Kroppen kan då definieras som ”termiskt tunn” och värmeledning kan beräknas med ”lumped heat capacity analysis” (Drysdale, 2011). Värmebalansen för en termisk tunn kropp blir som i ekvation 1.

$$Ah_{tot}(T_g - T) dt = \rho V c dT \quad (1)$$

Den vänstra sidan av ekvationen beskriver värmeöverföringen på grund av temperaturskillnaden mellan omgivande luft, T_g , och kroppens temperatur T . Mängden är beroende av värmetransportkoefficienten, h_{tot} , och arean, A , som värmeöverföringen sker över. Överföringen sker över ett visst tidsintervall, dt . Det högra ledet beskriver energin som krävs vid en förändring av temperaturen, dT . Temperaturförändringen beror på kroppens volym, V , kroppens densitet, ρ , samt värmekapacitet, c . Situationen kan illustreras som figur 8. Observera att kroppen inte behöver vara en sfär, den kan anta vilken form som helst så länge villkoret för termisk tunnhet är uppfyllt.



Figur 8. Illustration av luft som värmer upp termiskt tunn kropp.

Integreras ekvation 1 blir lösningen följande:

$$\frac{T - T_g}{T_0 - T_g} = e^{(-t/\frac{\rho V c}{h_{tot} A})} \quad (2)$$

Ekvation 2 kan användas för att beräkna tiden det tar för att uppnå en viss given temperatur, T . Den kan också användas för att beräkna temperaturen vid en given tid, t , förutsatt att T_g är given. För att förenkla ekvation 2 brukar samtliga konstanter i exponentialfunktionen sammanfogas till tidskonstanten τ , vilket presenteras i ekvation 3.

$$\tau = \frac{\rho V c}{h_{tot} A} \quad (3)$$

Värmetransportkoefficienten, h_{tot} , är faktorn som avgör hur mycket energi som överförs från omgivande medium till en kropp. Den kan delas upp i två delar, konvektion, h_k , och strålning, h_r . Adderas dessa ges den totala värmetransportkoefficienten, h_{tot} , vilket sedan används som indata i ekvation 3.

Konvektionskoefficienten, h_k , kan beräknas med empiriska formler med villkor anpassade efter kroppens geometriska form. För luftflöde kring en sfär går det att använda en beräkningsmetod där Reynolds tal, Prandtls tal och Nussels tal används (Kanury, 1975, s. 63). Första steget är att beräkna Reynolds tal, se ekvation 4, där u_∞ är den strömmande gasens hastighet, d är diametern på sfären och ν kinematisk viskositet för den strömmande gasen.

$$Re \equiv \frac{u_\infty * d}{\nu} \quad (4)$$

Nästa steg är att beräkna Prandtls tal, se ekvation 5. Där ν är kinematisk viskositet för gasen och α är termisk diffusivitet. Värdet för Prandtls tal finns också tabellerat då värdet endast är beroende av gasens temperatur.

$$Pr \equiv \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$

Nästa steg blir att beräkna Nussels tal, vilken ekvation som används beror på storleken av Reynolds tal. När $17 < Re < 7E^4$ beräknas Nussels tal med ekvation 6. Om $Re > 7E^4$ så används istället ekvation 7.

$$\bar{Nu}_d = 0,37 * Re^{0.6} \quad (6)$$

$$\bar{Nu}_d = 2 + 0,6 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Konvektionskoefficienten beräknas sedan med ett samband till Nussels tal, \bar{Nu}_d , vilket presenteras i ekvation 8, där h_k är medelkonvektionskoefficienten, d är diametern för sfären och k den strömmande gasens termiska konduktivitet.

$$\bar{h}_k \equiv \frac{\bar{Nu}_d * k}{d} \quad (8)$$

För värmeöverföringen från strålning kan en värmebalans användas, balansen förutsätter att emissivitet, ϵ , från kroppen och omgivande luft/flamma är 1 samt att synfaktorn, ϕ , är 1, detta presenteras i ekvation 9. Värdet för Stefan-Bolzmanns konstant, σ , är $5,67E^{-8}$ (Drysdale, 2011).

$$h_r(T_g - T_s) = \sigma \epsilon \phi * (T_g^4 - T_s^4) \quad (9)$$

Det vänstra ledet beskriver hur uppvärmningen sker av en kropp och det högra ledet beskriver strålningsdifferensen mellan kroppen och de omgivande brandgaserna. Det är temperaturdifferensen som medför en temperaturökning i kroppen. Ekvationen kan sedan skrivas om så värmetransport koefficient för strålning h_r kan beräknas som funktion av kroppens temperatur, T_s , och brandgasernas temperatur, T_g , se ekvation 10.

$$h_r = \frac{5,67 * 10^{-8}}{T_g - T_s} (T_g^4 - T_s^4) \quad (10)$$

Den totala värmetransportkoefficienten kan skrivas som summan av h_k och h_r , vilket är ekvation 8 och 10. Resultatet från ekvation 11 används sedan i ekvation 3 för att beräkna τ .

$$h_{tot} = \frac{\bar{Nu}_d * k}{d} + \frac{5,67 * 10^{-8}}{T_g - T_s} (T_g^4 - T_s^4) \quad (11)$$

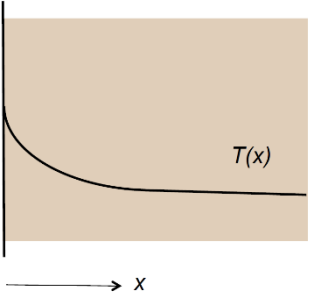
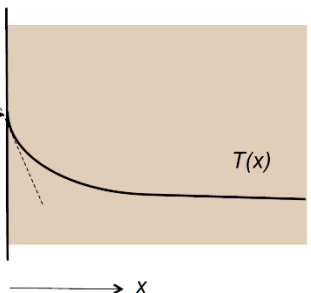
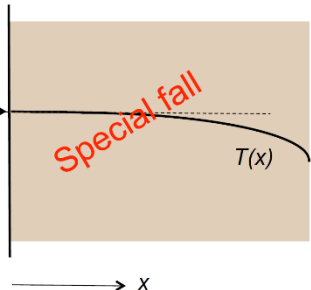
4.3.2 Numerisk beräkningsmodell

För en kropp som inte kan klassificeras som termiskt tunn går det att beräkna temperaturen med en numerisk beräkningsmodell. Den numeriska modellen nyttjar den termiskt tunna kroppens egenskaper och beräknar temperaturen i flera sådana som är placerade intill varandra. Så istället för att beräkna temperaturen i en kropp delas kroppen upp i mindre element. För varje tidsintervall Δt och element med tjockleken Δx ställs följande värmebalans upp:

$$[\text{Energi in}] - [\text{Energi ut}] = [\text{Lagrad energi}]$$

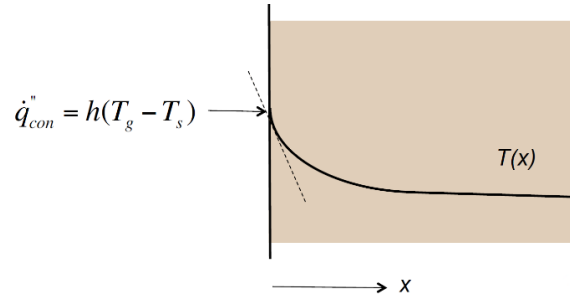
Resultatet från värmebalansen ger lagrad energi som sedan kan användas för att beräkna elementets temperatur. För det första elementet, det med en sida vänd mot branden, sker värmeutbyte via strålning och konvektion samt mot angränsande element sker värmeutbytet via konduktion (ledning). När flera termiskt tunna element staplas bredvid varandra sker värmetransporten via konduktion. För att beräkna temperaturen i varje element vid varje tidsintervall placeras beräkningsnoder i mitten av varje element. Elementets temperatur är nodens temperatur. Det första elementet får tjocklek $\Delta x/2$, då noden är placerad vid ytan. Vid första tidpunkten, t , startar alla element med utgångstemperatur $T_i(t)$ där i är nodens nummer. Under ett tidsintervall, Δt , sker värmeutbyte med närliggande element och luften vilket gör att den lagrade energin ökar eller minskar. Vid beräkning av värmeutbytet med omgivande luft och ytan används ett randvillkor, detta tar hänsyn hur värmeutbytet sker. Temperaturen i den första noden är direkt beroende av valt randvillkor. Det finns tre kategorier av randvillkor, vilket som används beror på hur värmetillförsel är modellerad samt syfte med beräkningen och presenteras i tabell 6.

Tabell 6. Beskrivning och illustration av randvillkor vid värmetransportberäkning. Samtliga bilder ägs av avdelningen för brandteknik, Lunds tekniska högskola.

| Randvillkor | Illustration |
|--|---|
| Typ 1 Temperaturen vid ytan anges. Kan vara konstant eller varierande med tid. | $T(0) = T_s$  <p>The diagram shows a vertical cross-section of a material slab. The horizontal axis is labeled 'x' and points to the right. The vertical axis is labeled 'T(x)'. A curve starts at a point on the vertical axis labeled 'Ts' and decreases as it moves to the right, leveling off. The area to the right of the vertical axis is shaded light brown.</p> |
| Typ 2a Angivet värmeväxling (heat flux) vid ytan. | $\dot{q}_s'' = -k \frac{dT}{dx} \Big _{x=0}$  <p>The diagram shows a vertical cross-section of a material slab. The horizontal axis is labeled 'x' and points to the right. The vertical axis is labeled 'T(x)'. A curve starts at a point on the vertical axis and decreases as it moves to the right, leveling off. A dashed line is tangent to the curve at the vertical axis. An arrow labeled 'q_s'' points to the right from the vertical axis. The area to the right of the vertical axis is shaded light brown.</p> |
| Typ 2b Angivet värmeväxling (heat flux) vid ytan. Ytan är perfekt isolerad. | $\dot{q}_s'' = 0$  <p>The diagram shows a vertical cross-section of a material slab. The horizontal axis is labeled 'x' and points to the right. The vertical axis is labeled 'T(x)'. A curve starts at a point on the vertical axis and decreases as it moves to the right, leveling off. A horizontal dashed line is tangent to the curve at the vertical axis. An arrow labeled 'q_s'' = 0' points to the right from the vertical axis. The area to the right of the vertical axis is shaded light brown. The text 'Special fall' is written in red across the diagram.</p> |

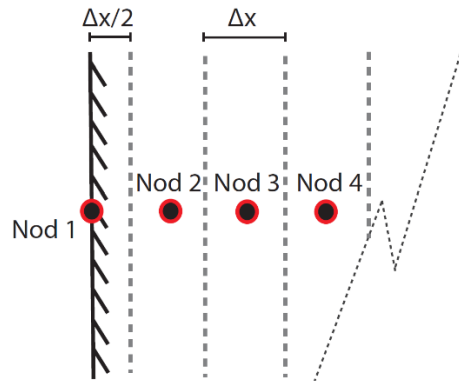
Typ 3

Värmefflux (heat flux) beror på temperaturskillnaden mellan gas och yta. Vid detta randvillkor är värmeöverföringen proportionell mot temperaturskillnaden.



För ett element mellan två andra element med temperaturen T_2 , där "2" hänvisar till elementet tillika nodens nummer, sker värmetransporten endast via konduktion. Värmebalansen för nod nummer 2 blir ekvation 12, se även figur 9. Förändring av den lagrade energin sker över tidsintervallet Δt .

$$\frac{k}{\Delta x}(T_1 - T_2) - \frac{k}{\Delta x}(T_2 - T_3) = \rho c \Delta x (T_2(t + \Delta t) - T_2(t)) \quad (12)$$



Figur 9. Illustration av noduppldelning för endimensionell värmetransport. Bilden ägs av avdelningen för brandteknik, Lunds tekniska högskola.

Den numeriska ekvationen som sedan används för att beräkna $T_2(t + \Delta t)$ blir då ekvation 13, vilket är en omskrivning av ekvation 12.

$$T_2(t + \Delta t) = T_2(t) + \frac{k}{\rho c (\Delta x)^2} (T_1 - 2T_2 + T_3) \quad (13)$$

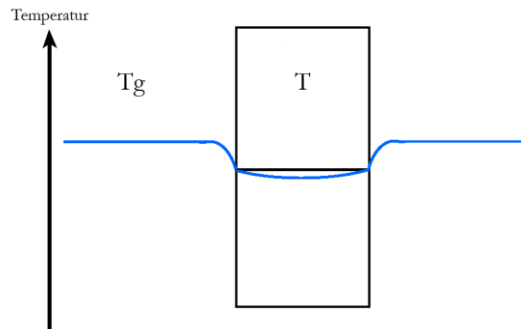
Ett villkor för en godkänd numerisk värmetransportberäkning är att Fouriers tal $Fo = \alpha \Delta t / (\Delta x)^2$ ska vara mindre än 0,5 (Drysdale, 2011). Där α är materialets termiska diffusivitet, Δt tidsintervallet för beräkning och Δx elementets tjocklek. Fouriers tal kan betraktas som en dimensionslös tidsvariabel vilken tar hänsyn till termiska egenskaper och karakteristisk tjocklek av en kropp.

4.3.3 Biots tal

Biots tal jämför effektiviteten för hur värme transporteras till en kropp via konvektion från omgivande luft och från ytan in i en solid kropp (Drysdale, 2011). Talet beräknas med ekvation 14 vilket också inkluderar en annan tolkning av Biots tal. L beräknas som förhållandet mellan kroppens volym och area, h_k är konvektionstalet och k är värmeledningstalet för kroppen.

$$Bi = \frac{h_k L}{k} = \frac{\text{Konvektionsmotstånd i solid}}{\text{Konvektionsmotstånd i gränssikt}} \quad (14)$$

Resultatet av beräkningen och vad det innebär kräver en mer detaljerad förklaring. Detta kan illustreras med figur 10 där den blåa linjen symboliserar den verkliga temperaturen för kroppen och omgivande luft. T_g är den omgivande luftens temperatur på båda sidor, precis vid ytan till kroppen finns det ett motstånd för att överföra energi. Motståndet beror på temperaturskillnaden mellan kroppen och luften, flödes hastighet, flödestyp och kroppen geometri. Motståndet kan beräknas via empiriska formler och resulterar i konvektionstalet, h_k . Detta medför att temperaturen precis vid ytan blir lite lägre än omgivande luft. Inne i kroppen finns det en temperaturgradient vilket gör att centralt i kroppen är temperaturen något lägre. Biots tal beräknar skillnaden mellan temperaturen i gradienten och om temperaturen hade varit homogen i hela kroppen (den svarta horisontella linjen i kroppen, figur 10). Är talet mindre än 0,1 så är skillnaden försumbar. Är det större än 0,1 finns det en gradient och beräknas temperaturen så överskattas den.



Figur 10. Illustration av termisk gradient i en kropp.

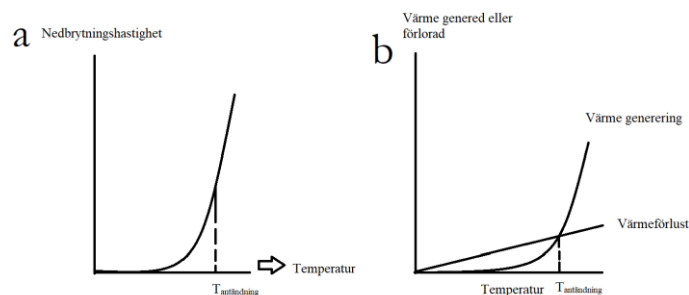
4.4 Förbränningsteori

Hastigheten för en kemisk reaktion är temperaturberoende, vilket beskrivs av Arrhenius formel, se ekvation 15, där k är reaktionshastighet, A är frekvensfaktor, E_A är aktiveringsenergi, R är gaskonstanten och T är temperaturen (Zumdahl, 1992).

$$k_{Arrhenius} = Ae^{-\left(\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (15)$$

Sambandet är exponentiellt och illustrerats förenklat i figur 11a. Antändningen av ett explosivämne sker när det värms upp till eller över sin antändningstemperatur (Akhavan, 2004). Förbränningen i förbränningszonen kan ske som en detonation eller en deflagration. Beroende på ämnet, reaktionshastigheten och dess tryckuppbyggnad kan antändningen resultera i en explosion.

Antändningstemperaturen är den lägsta temperaturen då reaktionen kan vara självförsörjande, är temperaturen lägre så är värmeförlusten för stor, detta illustreras i figur 11b.



Figur 11. a) Illustration över hur nedbrytningshastigheten är beroende av temperaturen. b) Illustration över hur värmeförlust påverkar $T_{antändning}$

Ett ämne behöver inte värmas upp till dess antändningstemperatur för att brytas ner. Även vid lägre temperaturer sker nedbrytning av sprängämnet, men den är då långsammare. Viktigt att poängtera är att antändning kan ske även om ämnet inte värmts upp hela vägen till antändningstemperatur (Sejlitiz, 2009). Vid termisk sönderdelning sker exotermiska processer som genererar stora mängder värme. En del av den

generade värmen är förlorad till omgivningen på grund av yttre kylning. Resterande mängd höjer temperaturen i ämnet vilket medför att nedbrytningen sker snabbare.

Antändningstemperaturen för ett explosivämne är således beroende av uppvärmningshastighet, mängd och geometri. På grund av de stora mängderna energi som frigörs från explosivämnen sker vanligen undersökningar i liten skala (Folly, 2004). Antändningstemperaturen kan definieras som när ett explosivämne placeras i ett externt uppvärmt provrör och börjar brinna, deflagrerar eller detonerar. En metod för att testa detta är att provet placeras i en 100 °C ugn. Efter detta höjs temperaturen med 20 °C per minut till antändning sker. Det går också att undersöka antändningstemperatur med ett så kallat ”cook off”-test där en större mängd sprängämne undersöks. Vid ett ”slow cook off”-test värms explosivämnet upp till 40 °C och vidhålls vid temperaturen i 6 timmar, för att sedan höja temperaturen med 3,3 °C per timme. Beroende på försöksupställning med eller utan behållare och skala kan antändningstemperaturen variera, det är därför viktigt att med försiktighet översätta resultat från liten skala till större skala (Folly, 2004).

4.5 Osäkerheter

Alla typer av risk- och brandanalyser kräver ett antal antagande och förenklingar på grund av problemets komplexitet. Vid riskanalyser kan osäkerheter delas in i följande grupperingar (Bolsover et al, 1998).

- Osäkerheter kopplat till data och parametrar
- Osäkerheter kopplade till modeller
- Osäkerheter kopplade till kompetens

Det är viktigt vid genomförande av en analys att ha detta i åtanke och redovisa de osäkerheter som råder i val av indata, modeller och författarens kompetens. Osäkerheter kring indata kan hanteras genom att använda statistiska fördelningar med tillhörande Monte-Carlo-simuleringar och genomföra känslighetsanalyser. På så sätt hanteras spridning som kan finnas för indata. Detta kan vara lämpligt för faktorer som har en naturlig variation, till exempel utomhustemperatur. Osäkerheter för parametrar kan också hanteras genom att använda ett konservativt värde vilket inför en säkerhetsmarginal i resultatet. Osäkerheter kring modeller baseras på modellernas förmåga att kunna återspegla realiteten (Davidsson et al., 2003). En metod för att hantera modellosäkerheter är att genomföra beräkningar i två oberoende modeller och sedan jämföra resultatet. Osäkerheter kopplade till kompetens är mer av obestämd natur. Davidsson et al. (2003) skriver att människor kan introducera osäkerheter avsiktligt (till exempel genom försummande modellering av komplicerade aspekter) eller oavsiktligt (på grund av okunskap).

5 MODELLERAD BRAND

Kommande kapitel diskuterar indata vid det brandscenario som användes vid värmetransportberäkningar. Detta inkluderar brandens beteende, termiska egenskaper för marken samt termiska egenskaper för ammunitionen. I sista avsnittet redovisas hur osäkerheter hanterades.

5.1 Brandens temperatur-tid kurva

Valet av temperaturer-tid kurva genomfördes utifrån två principer: 1) Kurvan ska i största möjliga mån baseras på resultat och kunskap erhållit från litteraturstudien. 2) Kurvan ska vara representativ för ett realistiskt brandscenario vid skjutfältet. Branden som genererar kurvan ska vara utmanande men inte orealistisk eller överdrivet konservativ.

Litteraturstudien och tidigare erhållen kunskap visar att ett brandförlopp förenklat består av tre stadier: 1) Tillväxt, 2) Fullt utvecklad/maximal temperatur och 3) Avsvälning. Vid valet av temperaturkurva har dessa tre delar fungerat som en struktur.

Två av tre utvalda publikationer som har legat till grund för temperatur-tid kurvan registrerande temperaturförändringen med hjälp av termoelement, det är därför framförallt dessa som har använts. Santín et al. (2016) och Taylor et al. (2004) redovisar en kraftig temperaturökning när brandfronten anländer till mätplatserna. I figur 4/figur 12 presenterades en typisk temperatur-tid kurva från Taylor et al. (2004, ss. 1572), anledningen till kurvan inte fortsätter efter 60 sekunder är ingen mer data presenteras i deras artikel. Utifrån information hämtad från Santín et al. (2016) presenteras två kurvor med olika tillväxthastighet med maximal temperatur på 976 °C. Den snabba kurvan, illustrerad i svart i figur 12, når maximal temperatur efter 50 sekunder medan den långsammare, illustrerad i orange, når maximal temperatur efter 200 sekunder. Dessa tider utgör spridningsintervallet för resultatet presenteras av Santín et al. (2016), det finns alltså temperaturkurvor som når maximal temperatur inom intervallet 50–200 sekunder. Utöver information om tillväxthastighet har kurvorna kompletteras med information om varaktighet över vissa gränsvärdestemperaturer samt avsvälningshastighet. Denna information är illustrerade med streckade linjer från respektive tillväxtkurva. För kurvorna som är presenterade som ”Övre gräns” tog det 2000 sekunder att återgå till utgångstemperaturen, för de som är presenterades som ”Undre gräns” tog det 500 sekunder.

Samtliga tre artiklar i avsnitt 2.2 redovisar att temperaturen som utvecklas vid en skogsbrand kan överstiga 1000 °C i marknivå. Andersson och Baileys resultat visar 982 °C men viktigt att poängtera är att nästa pellets smälttemperatur var 1371 °C. När temperaturen loggas med pellets går det inte att beskriva temperaturen som en funktion av tid. Därför kan inte resultatet från Andersson och Baileys appliceras mer än ett referensvärde för maximal temperatur.

Informationen som erhållits från litteraturen redovisar att temperaturen stiger fort när en skogsbrand passerar. Vid skjutfältet finns det löv- och barrskog vilket påverkar brandförloppet, lövskog dämpar generellt och barrskog accelererar skogsbranden (Hansen, 2003). Blandningen av trädslagen gjorde att kurvans tillväxthastighet sattes till lite långsammare än maximalt redovisat i Santín et al. (2016), tiden för detta valdes till 1 minut. Ingående variabler för tillväxten blev således $T_{\text{Max}} = 1000^{\circ}\text{C}$ vid tidpunkten 1 minut. För detta räknades det ut en exponentiell tillväxtkoefficient enligt sambandet $T = at^2$. Där a är tillväxtkoefficient med enheten $^{\circ}\text{C}/\text{s}^2$, T är temperatur i $^{\circ}\text{C}$ och t är tid i sekunder.

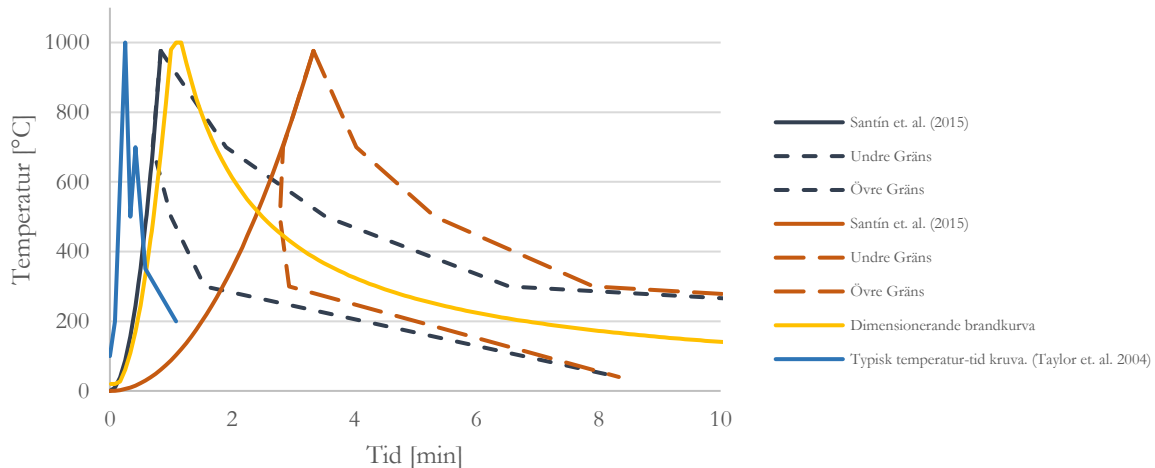
För att bestämma egenskaperna avsvälningssfasen fanns det endast en referens i litteraturstudien som kunde användas. Vid Santín et al. (2016) experiment tog det maximalt 2000 sekunder innan temperaturen i markytan återgick till normaltillstånd. Att temperaturen sjönk snabbt efter att brandfronten passerat bedömdes rimligt, det bedömdes också rimligt att det tog lång tid innan temperaturen återgår till normaltillstånd. Kurvans beteende under avsvälning placerades i mitten av detta intervall.

Utifrån ovanstående valdes en sannolik temperatur-tid kurva för en skogsbrand vid Skillingaryds skjutfälts målområde. För att underlätta för läsaren kallas den från och med nu dimensionerande brandkurva och

presenteras i gul färg i figur 12. Kurvan har en aggressiv tillväxtfas, när maximal temperaturen under en kort tid för att sedan sjunka i temperatur förhållandevis snabbt.

Kurvans temperatur beskrivs över en timme då det i senare delar av arbetet är av intresse att följa värmevågen långt efter att brandfronten har passerat.

Temperatur vid markytan som funktion av tid



Figur 12. Temperatur-tid kurvor från experiment samt vald dimensionerad brandkurva.

För att underlätta vid beräkningar anpassades matematiska uttryck till brandkurvan, dessa presenteras i tabell 7. För att erhålla de matematiska uttrycken användes funktionen ”anpassa linje” i Excel och den som stämde bäst överens valdes. Då ingen funktion kunde anpassas för hela brandförloppet delades kurvan upp i de tre faserna, tillväxt, konstant och minskning, vilket medförde att kurvan beskrivs med hjälp av tre funktioner. Samtliga matematiska uttryck är endast giltigt inom angivet tidsintervall.

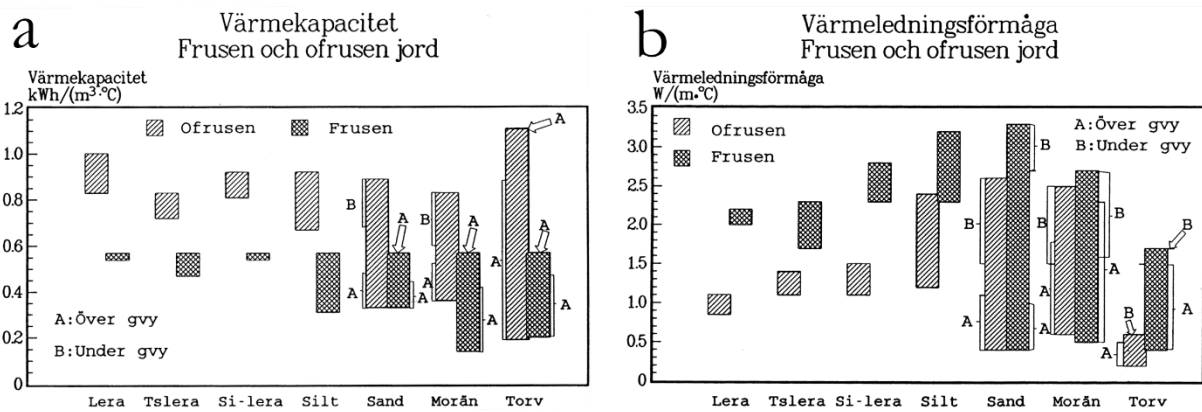
Tabell 7. Matematiska uttryck för dimensionerad brandkurva.

| Fas | Tidsintervall [s] | Funktion som beskriver temperatur [°C] |
|-----------|-----------------------|--|
| Tillväxt | $0 \leq t < 60$ | $T = 20 + 0,278 * t^2$ |
| Konstant | $60 \leq t < 75$ | $T = 1000$ |
| Minskning | $75 \leq t \leq 3600$ | $T = 48709 * t^{-0,914}$ |

5.2 Markegenskaper

Temperaturen i marken bestäms av värmetransporten och hur utbytet sker med omgivningen vid markytan. Värmeöverföring kan ske via ledning, strålning och konvektion. Vid markytan sker värmeöverföring genom samtliga tre typer men under markytan sker det via ledning och konvektion med eller utan latent värmetransport (Koorevaar, Menelik, & Dirksen, 1983). Ledningen beror på jordens värmekapacitet och konduktivitet. Det termiska egenskaperna för jord är starkt beroende av vattenhalt. Jord är uppbyggd av korn och kring dessa finns det porer, när porerna fylls med vatten ökar ledningsförmågan upp till 20 gånger (Sundberg, 1991). Det är också så att vid högre temperaturer så blir ångdiffusion allt mer betydande.

Vid modellering av värmetransport har en förenklad modell valts. Hur metodvalet påverkar resultatet diskuteras i kapitel 7. Som presenterats i avsnitt 3.2, så är den dominerande jordarten inom målområdet morän. Värmekapacitet och värmeledningsförmåga för sju jordarter presenteras i figur 13a och figur 13b (Sundberg, 1991).



Figur 13. a) Värmekapacitet för frusen och ofrusen jord beroende av jordart. b) Värmeledningsförmåga för frusen och ofrusen jord beroende av jordart. Information hämtad från Sundberg (1991). Figureerna ägs av SGI.

Indata valdes för morän över grundvattenytan och vid ofrusna förhållanden. Detta är förhållanden som förväntas råda vid modellerad skogsbrand i målområdet. Båda termiska egenskaperna har en viss spridning, för att ta hänsyn till detta användes en likformigfördelning med min-max värde från figur 13a och b som gränser. Fördelningarna presenteras i tabell 8.

Tabell 8. Termiska egenskaper för morän ovan grundvattenyta (gvy) och vid ofrusen tillstånd.

| Termisk egenskap | Värde | Enhet |
|--|-----------|---------------------|
| Värmekapacitet, volymetrisk ⁴ | 1,26–1,98 | MJ/m ³ K |
| Värmeledningsförmåga | 0,6–1,8 | W/mK |

Båda dessa variabler modellerades utan temperaturberoende och ingen hänsyn har tagits till vattens förångningsentalpi. Detta då modellen inte på ett tillfredställande sätt kunde hantera detta samt data saknades för hela teoretiska temperaturintervall. Antagandet är konservativt då energin som krävs för att värma upp vattnet och förånga det försummas, vilket medför en högre beräknad temperatur i marken.

Marktemperaturen modellerades som homogen i hela marklagret och starttemperaturen valdes till 18 °C. Temperaturen motsvarar 95% percentilen för temperaturen i maj, juni, juli och augusti under perioden 2000–2019 för mätstationen ”Hagshult Mo” (SMHI, 2019). Mätstationen är placerad cirka 2 mil söder om Vaggeryd.

5.3 Ammunitionsegenskaper

Enligt information från SWEDEC använder samtliga granater trotyl som verkande sprängämne. Trotyl är även känt vid namnet TNT och har det kemiska namnet 2,4,6-trinitrotolouen. Sprängämnet är ett av militärens viktigaste då det är har bra gjutbarhet, stabilitet och låg känslighet i förening. I granater förvaras det gjutet i fast form med en smältpunkt på 81 °C. De termiska egenskaperna för höljet av stål och för trotyl presenteras i tabell 9.

Tabell 9. Fysiska egenskaper för stål och trotyl.

| Egenskap | Stål | Trotyl | Enhet |
|--------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Värmeledningstal | 45,8 ^a | 0,23–0,26 ^b | W/mK |
| Densitet | 7580 ^a | 1654 ^c | kg/m ³ |
| Värmekapacitet | 460 ^a | 1294–1530 ^b | J/kgK |
| Smälttemperatur | - | 81 ^d | °C |
| Sönderdelningstemperatur | - | 200 ^d | °C |
| Antändningstemperatur | - | 300 ^d | °C |

⁴ Värmekapaciteten C kan skrivas som produkten av $\rho * c$ där ρ är densitet (kg/m³) och c är värmekapacitet per viktenhet (kWh/kg °C). 1 kWh/m³ °C = 3,6 MJ/m³ °C

^a (Drysdale, 2011)^c (Sejlitz, 2009)^b (Van Dam et al., 2015)^d (Asante et al., 2015)

Egenskaperna som presenteras i tabell 10 och tabell 11 är baserade på material som har tillhandhållits från SWEDEC. Vissa av värdena är tagna direkt från produktbeskrivning och andra uppmätta på ritningar. Samtliga granater har en efterföljande siffra, vilket anger diametern vid den bredaste punkten på granaten. I fortsättning av rapporten kommer dessa siffror alltid presenteras i samband med resultat för att särskilja de två sprängvinggranaterna och de två sprängvinggranaterna.

Tabell 10. Beskrivning av viktiga egenskaper för utvalda sprängvinggranater.



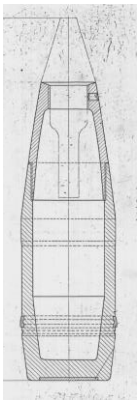

| | Sprängvinggranat 80 | Sprängvinggranat 120 | Enhet |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|
| Dimensioner (LxD) | 355 x 80 | 571 x 120 | mm |
| Godstjocklek | 8,9 | 17 | mm |
| Total vikt (ink. sprängämne) | 3,4 | 12,8 | kg |
| Vikt (huvudladdning) | 0,6 | 2,2 | kg |

Tabell 11. Beskrivning av viktiga egenskaper för utvalda spränggranater.

| | Spränggranat 105 | Spränggranat 155 | Enhet |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|
| Dimensioner (LxD) | 405 x 105 | 605 (exklusive spets) x 155 | mm |
| Godstjocklek | 12,5 | 16 | mm |
| Total vikt (ink. sprängämne) | 11,7 | 38 | kg |
| Vikt (huvudladdning) | 1,77 | 6,73 | kg |

I tabell 12 presenteras bilder på samtliga granater, observera att bilderna ej är skalnligena i förhållande till varandra.

Tabell 12. Bilder på utvalda granater. Samtliga bilder ägs av Försvarsmakten/SWEDEC.

| SVINGGR 80 | SVINGGR 120 | SGR 105 | SGR 155 |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |

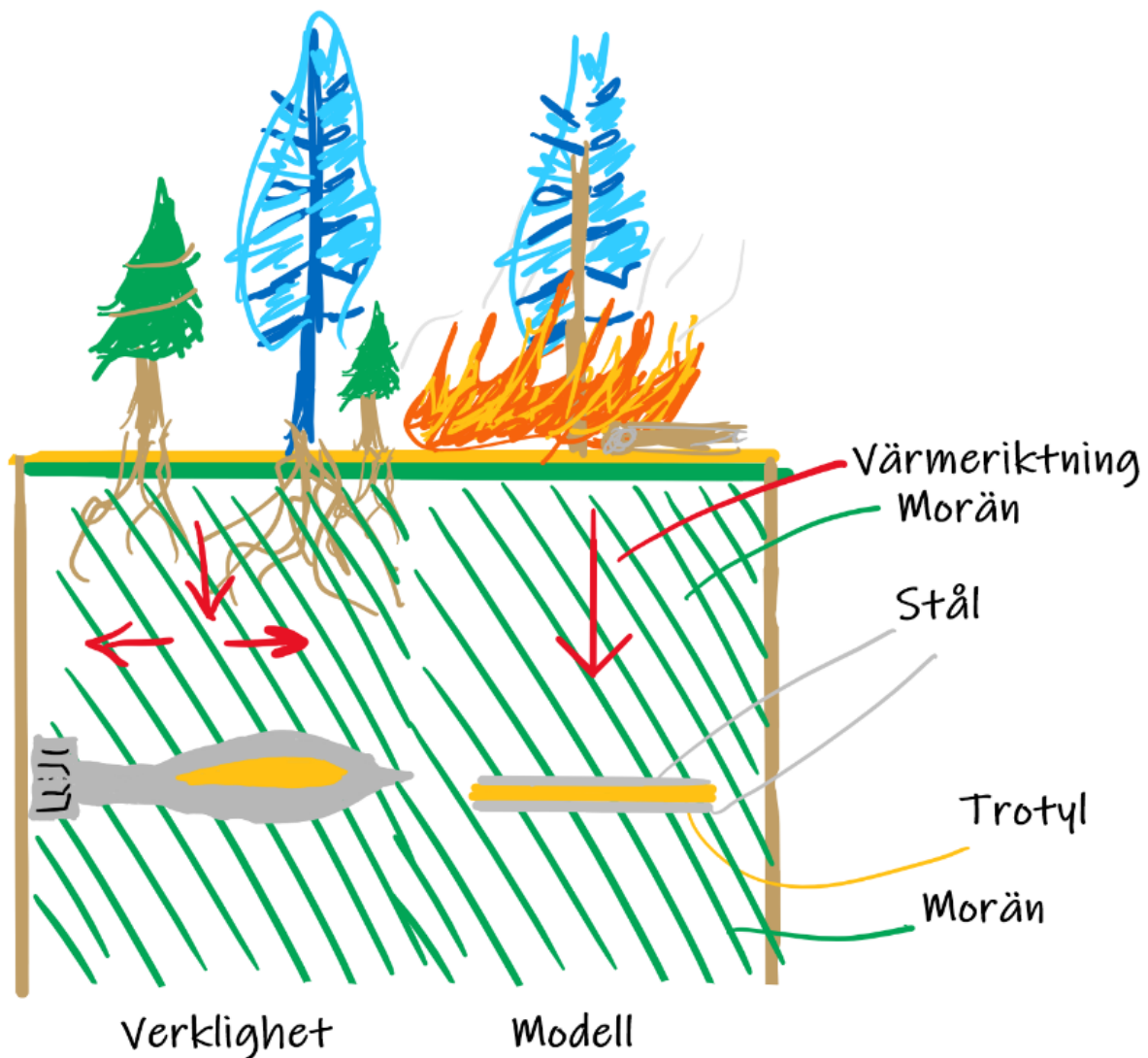
5.4 Modellering av värmetransport

Kommande avsnitt förtydligar hur teoretiska beräkningsmodeller har applicerat vid beräkning av brandexponerade granater, teorin bakom dessa presenteras i avsnitt 4.3.1 och 4.3.2. Båda metoderna som används innehåller förenklingar. En av dessa är att om temperaturen överstiger 81 °C tas ingen hänsyn till energin som krävs för trotyls fasövergång från fast till flytande, förångningsentalpin. Ingen hänsyn tas heller till att variabler kan variera med temperatur utan värden som använts är applicerbara vid rumstemperatur om inget annat anges.

5.4.1 Under markytan

Randvillkoret av typ 1 valdes (temperaturen vid ytan anges) vid modellering av värmetransport, anledningen till detta var att mätdata som den dimensionerande brandkurvan baseras på har mätts precis i markytan. Hade något av de andra randvillkoren valts hade ett termiskt motstånd introducerats vilket hade medfört ett långsammare förlopp. Data som brandkurvan baseras på att framtagen i marknivå.

Då den valda beräkningsmodellen är av endimensionell karaktär (1D) så går det inte att modellera värmetransport i sidled. Detta medför att granater liggande i marken modelleras som tre skivor i ”sandwich”-formation. Första skivan modelleras med ståls termiska egenskaper och har höljets tjocklek (godstjockleken). Den andra skivan modelleras med trotyls termiska egenskaper, tjockleken på lagret blir diametern, D , minus två gånger godstjockleken. Sista skivan modelleras likt den första av stål och med höljets tjocklek. Detta illustreras i figur 14, där stål illustreras av grå linje, trotyl illustreras av orange linje och områden med morän illustreras av grönvitrandigt mönster.

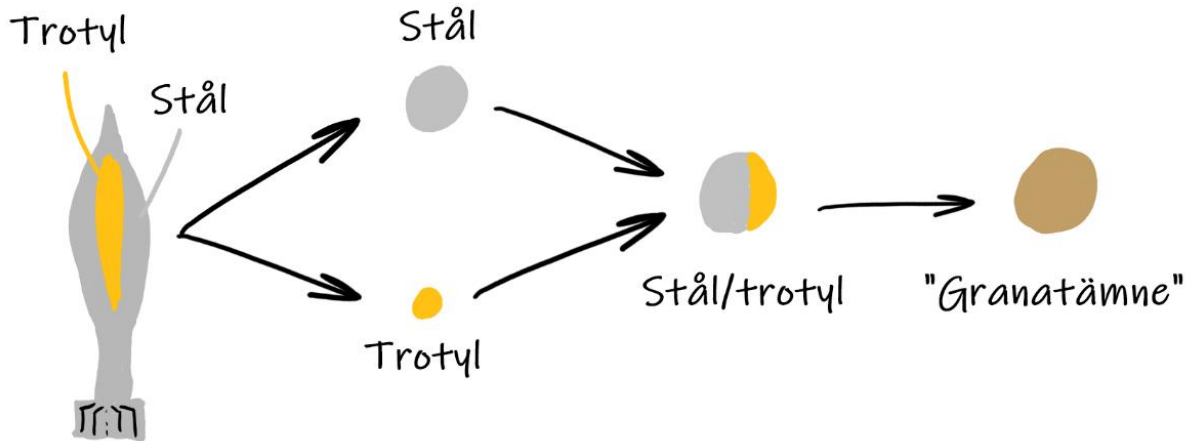


Figur 14. Illustration över hur modellering har genomförts under markytan.

En metod som ofta används för att verifiera termisk tunnhet är att Biots tal för första elementet ska vara mindre än 0,1. Med valt randvillkor används inget konvektionstal, h_k , vilket medför att Biots tal inte kan beräknas. Istället verifieras termisk tunnhet med en känslighetsanalys där kriteriet är att resultatet inte får variera även om avståndet mellan noderna minskar. Metod och tillhörande verifikation presenteras detaljerat i Bilaga A – Verifikation av termisk tunnhet.

5.4.2 Ovan markytan

Vid beräkning ovan markytan används LHC analysis. Vid analys av temperatur gjordes förenklingar av granaternas geometri för att nyttja beräkningsmodellen. Då granaterna primärt består av två material, trotyl och stål, användes en vägning utifrån deras massa för att skapa ett nytt "granatämne". Detta för att spegla granaternas totala termiska egenskaper. Utifrån vägningen beräknades "granatämnet"s densitet, värmeledningsförmåga och värmekapacitet. Med total massa och ny densitet beräknades sedan en "granatvolym" som omvandlades till volymen för en sfär. Beräkningstegen från granat till sfär av "granatämne" illustreras i figur 15.



Figur 15. Illustration hur modellering av granater ovan markytan har genomförts.

Det är sedan för sfären av "granatämne" som temperaturen beräknas. Som presenterades i ekvation 5 är en faktor som påverkar värmetransportkoefficienten vindhastigheten, denna valdes till det statistiska värdet 15 m/s. Värdet är väldigt osäkert, Taylor et al. (2004) redovisar en maximal vindhastighet på 9,6 m/s (34,4 km/h). Deras vindhastighet är uppmätt utanför testområdet på ett 10 meter högt torn, vilket inte behöver vara samma som hastigheten i branden. Raupach (1990) presenterar en modell för att beräkna "fire-wind speed". Modellen är förhållandevis enkel och kräver endast brandintensiteten, temperaturen och luftkonstanter för att beräkna vindhastigheten. Brandintensitet är en variabel som ej används i denna rapport och därför används inte modellen. Det bedöms att användning av modellen endast hade introducerat osäkerheter som inte kan hanteras på ett adekvat sätt. Vidare förkastar Beer (1990) modellen, han bedömer att Raupachs modell inte är tillräcklig komplex för att ge bra resultat.

Metoden kan inte hantera varierande temperatur. Lösningen blir att dela upp beräkningarna i olika sektioner och vid dessa hålla samtliga variabler konstanta, resultatet från beräkningar i serie 1 blir sedan indata i serie 2. I Bilaga C – Lumped Heat Capacity Analysis presenteras hur den dimensionerande brandkurvan delades upp för att användas.

5.5 Hantering av osäkerheter

Som presenterades i avsnitt 4.5 introduceras det osäkerheter vid en analys. Den dimensionerande brandkurvan har valts utifrån den litteratur som identifierades vid litteraturstudien. Det kan finnas lämplig litteratur som hade varit väl applicerbart på förhållanden vid skjutfältet men som inte hittades. Data som hittades och presenteras i detta arbete har samtliga bedömts varit framtagna vid kraftiga bränder vid verkliga förhållanden. Den kurvan som valdes bedöms vara en utmaning för systemet utan att vara oralistisk. Kurvan bedöms inte vara av "värsta troliga" karaktär vilket är ett medveten val.

5.5.1 Numerisk värmeberäkning

Vid valet av markegenskaper användes en karttjänst från SGU (2019a). Karttjänsten presenterade att den primära jordarten i målområdet var morän med ett litet område isälvsediment. Djupdykning i karttjänsten berättade att det översta jordlagret i området med isälvsediment var sand. Sands termiska egenskaper var

väldigt lika de för morän, se figur 13. Trots detta genomfördes beräkningar med sand som markmaterial för att undersöka hur materialbytet påverkar resultatet. Sands termiska egenskaper presenteras i tabell 13.

Tabell 13. Sands termiska egenskaper. För källa se figur 13.

| Termisk egenskap | Värde | Enhet |
|-----------------------------|----------|---------------------|
| Värmekapacitet, volymetrisk | 1,26–1,8 | MJ/m ³ K |
| Värmeledningsförmåga | 0,4–1,1 | W/mK |

Vattenhalten är en viktig variabel vid beräkning av värmetransport i mark, detta hanterades genom att inkluderas i de termiska egenskaperna för morän. Moräns termiska egenskaper modellerades som en likformig fördelning. Geometrin för ammunitionen har betraktats som statistiska värden då det inte finns någon information som tyder på variation i dessa. Termiska egenskaper för trotyl modellerades med ett statistiskt värde och en likformig fördelning.

Den numeriska beräkningsmodellen genomfördes i Excel tillsammans med @Risk. @Risk hanterar de likformiga fördelningarna via Monte-Carlo simulering. Beräkningarna genomfördes 1000 gånger och presenterade värden är medelvärde, 5–95% intervall samt max- och minvärde. Vidare kommer också en känslighetsanalys genomföras för att undersöka vilka ingående parametrar som påverkar resultatet mest. Metoden som användes undersöker korrelationskoefficienten, ρ . Resultatet från en sådan beräkning kan ge $-1 \leq \rho \leq 1$. Vid ett linjärt samband mellan två slumpvariabler blir korrelationskoefficienten +1 om linjen har en positiv lutning och -1 om lutningen är negativ (Körner & Wahlgren, 2006).

Modellosäkerheter gällande den numeriska modellen har hanterats genom att jämföra den mot en analytisk beräkningsmodell. Metod och resultatet för detta presenteras i Bilaga E – Jämförelse med annan värmetransportmodell.

5.5.2 Lumped heat capacity analysis

Osäkerheter kring vindhastigheten för LHC analysis hanteras via en känslighetsanalys. En hel beräkningsserie genomförs för SVINGGR 80. Vindhastigheten varierar med 50%, 80%, 120% samt 150% av ursprungsvärdet. Alla granategenskaper betraktas som statistiska. Ingen jämförelseberäkning mot annan beräkningsmodell har använts.

6 RESULTAT

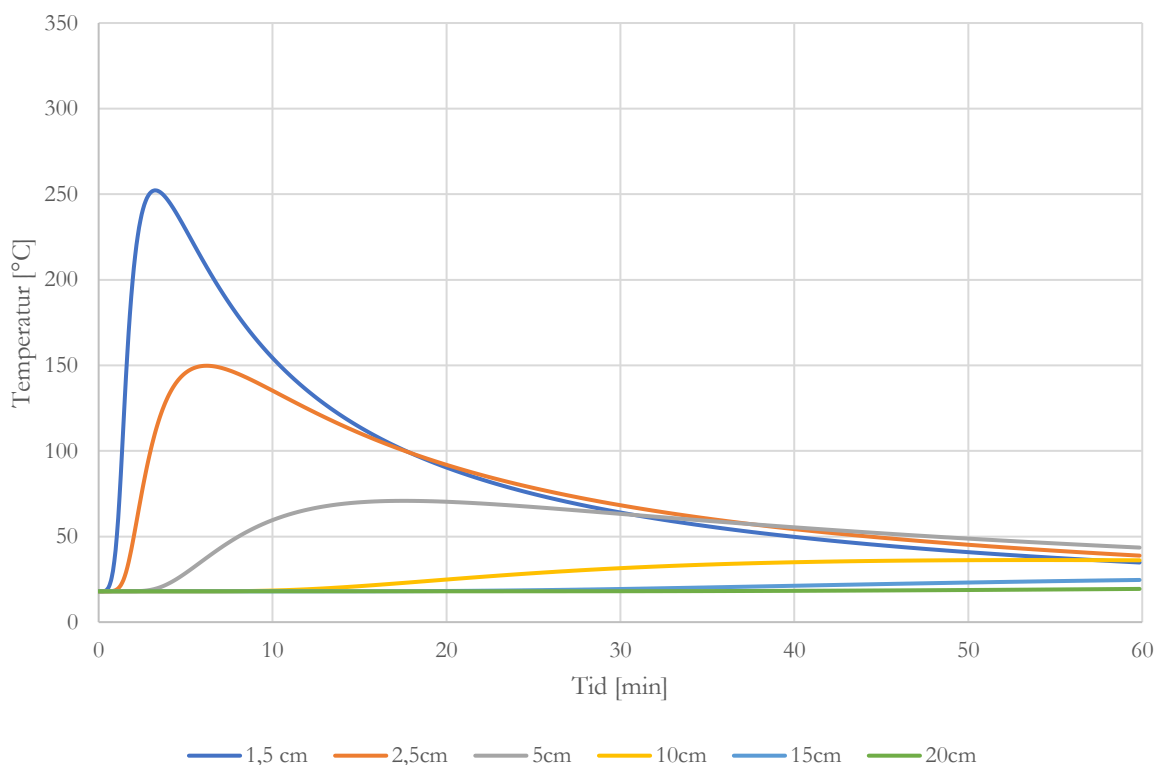
6.1 Under markytan

Samtliga numeriska beräkningar genomfördes med 1000 iterationer. Resultat redovisas endast vid de markdjup där det finns en påverkan från branden.

6.1.1 Marktemperatur

I följande avsnitt presenteras resultat från numerisk värmetransportberäkning. Figur 16 presenterar medeltemperaturen som funktion av tid vid olika markdjup. Vid 1,5 centimeters markdjup blir värmepåverkan från branden tydlig och temperaturen stiger till ungefär 250 °C efter cirka 3 minuter. Djupare ner i marken har effekten från värmevägen bromsats upp av markens termiska tröghet och massa.

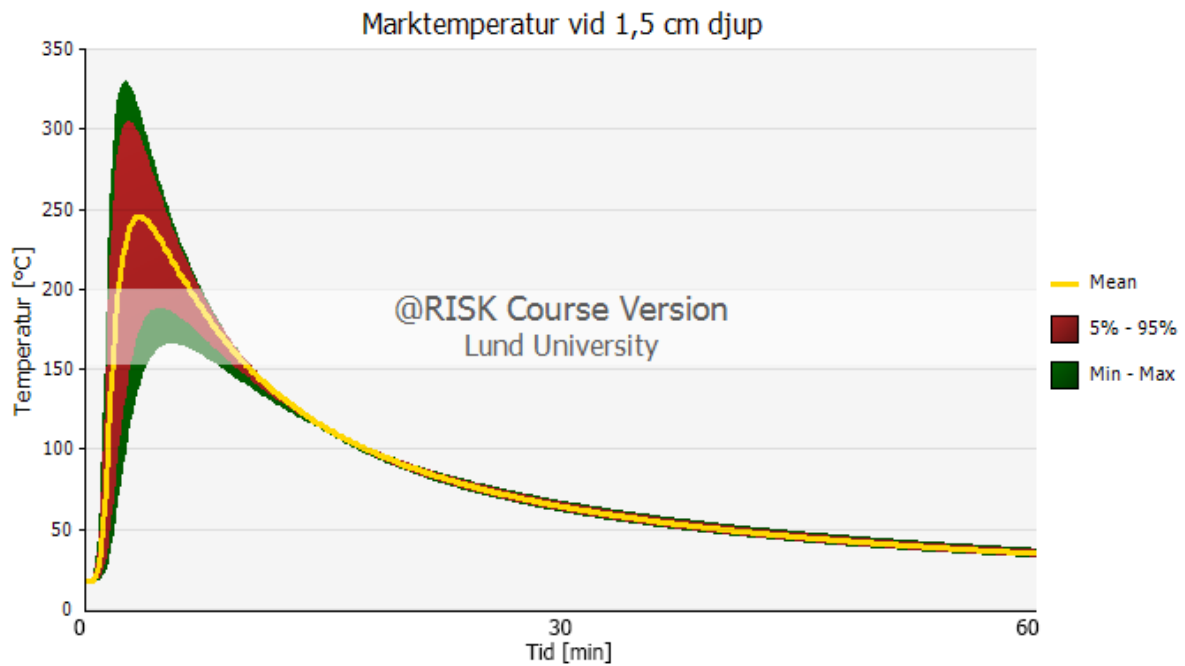
Medelmarktemperatur vid olika markdjup som funktion av tid



Figur 16. Medelmarktemperatur vid olika markdjup.

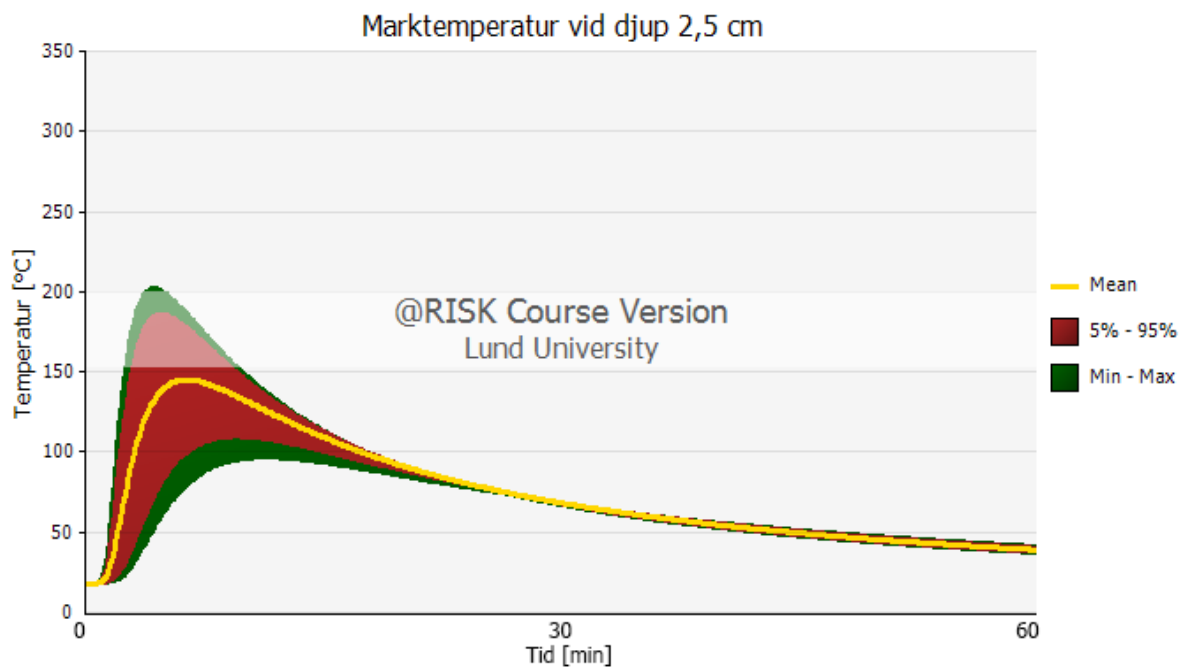
Varje linje i figur 16 innehåller en statistik spridning då indata modellerades med likformiga fördelningar. I följande fem figurer presenteras statistisk spridning för resultatet vid varje markdjup. Figurerna presenterar medelvärde, 5–95% intervall samt min-max värden som funktion av tid.

Figur 17 visar att marktemperaturen kan nå högre värden än cirka 250 °C. Temperaturen kan vid rätt förhållanden nå cirka 325 °C. Resultatet från 95% av alla simuleringar visar att temperaturen inte överstiger 305°C.



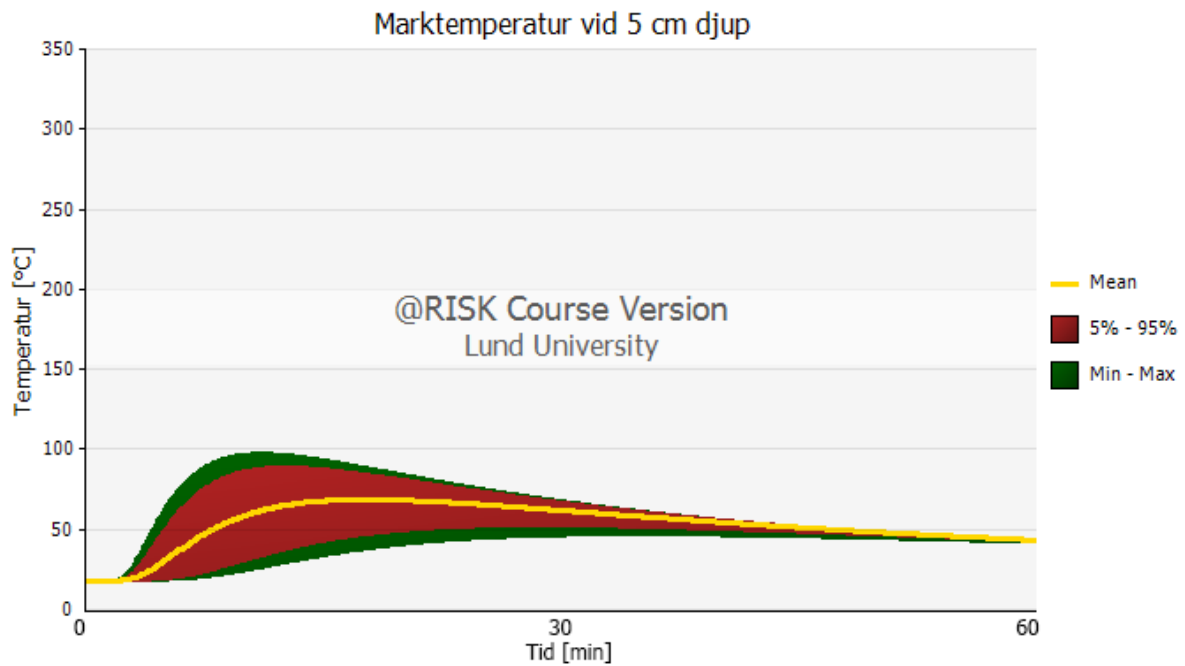
Figur 17. Spridningskurva för marktemperatur vid 1,5 cm markdjup.

Vid djupet 2,5 cm överstiger temperaturen inte 210 °C, se figur 18. Det finns fortfarande en stor spridning kring medelvärdet då max-min kan variera med 150 °C beroende på markens egenskaper.



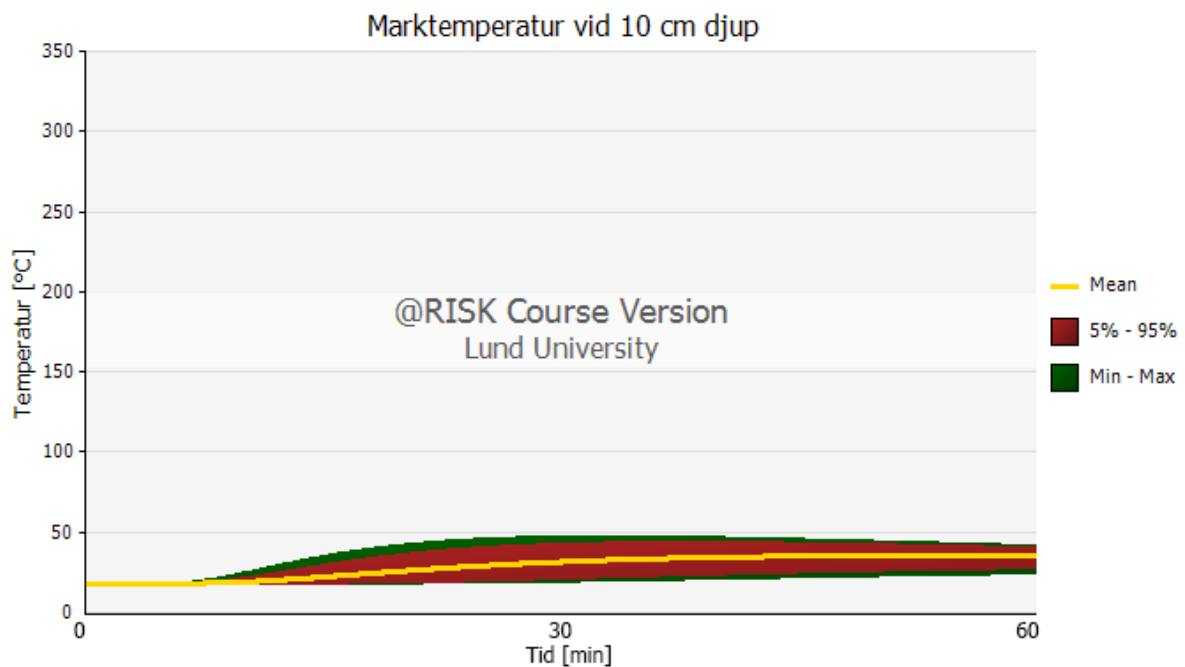
Figur 18. Spridningskurva för marktemperatur vid 2,5 cm markdjup.

Vid 5 centimeter under markytan, figur 19, är temperaturen profilen lik den vid 2,5 centimeter. Högsta temperaturen är lägre, den högst beräknade temperaturen är precis under 100 °C och 95% av alla simuleringar visar att temperaturen inte överstiger 90 °C.



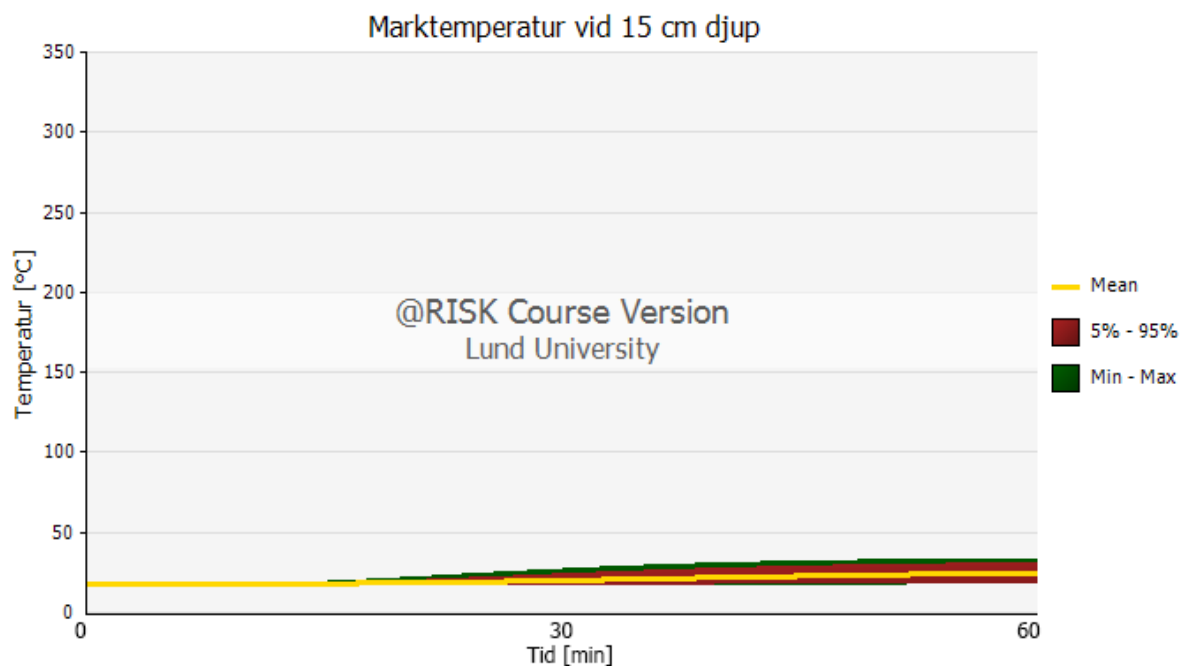
Figur 19. Spridningskurva för marktemperatur vid 5 cm markdjup.

I figur 20 presenteras spridningskurvan för marken vid 10 centimeters djup. Marktemperaturen kan under hela brandförloppet betraktas som konstant. Den högst beräknade temperaturen överstiger aldrig 50 °C.



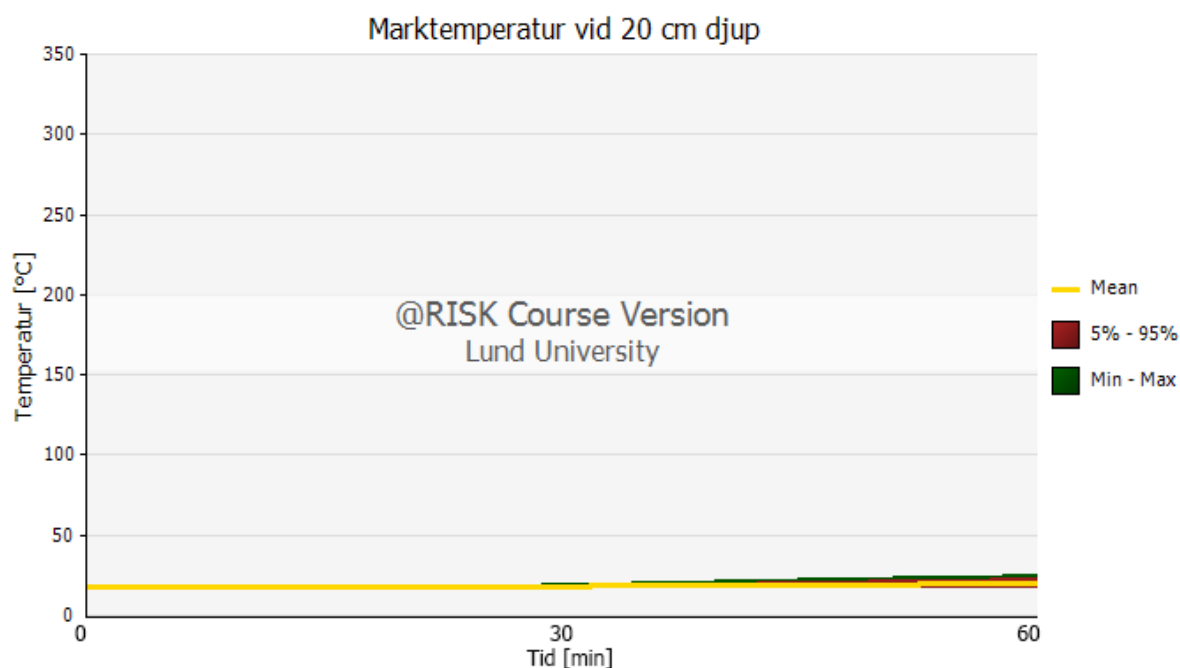
Figur 20. Spridningskurva för marktemperatur vid 10 cm markdjup.

I figur 21 presenteras spridningskurvan för marken vid 15 centimeters markdjup. Marktemperaturen kan under hela brandförloppet betraktas som konstant. Den högst beräknade temperaturen överstiger aldrig 40 °C.



Figur 21. Spridningskurva för marktemperatur vid 15 cm markdjup.

Figur 22 visar marktemperaturen vid 20 centimeters markdjup. Effekten skogsbranden är vid detta markdjup inte märkbar och ingen märkbar effekt noteras.



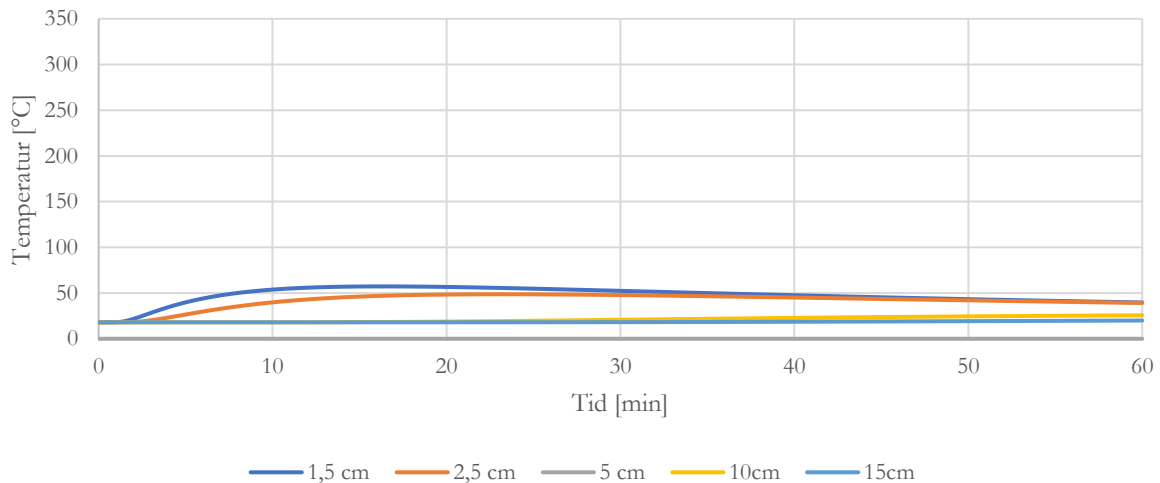
Figur 22. Spridningskurva för marktemperatur vid 20 cm markdjup.

6.1.2 Granattemperatur

Figureerna i kommande avsnitt presenterar resultat från värmetransportberäkningar i mark där en modellerad sprängvinggranat 80 placerats. Metoden för detta presenterades i avsnitt 5.4.1.

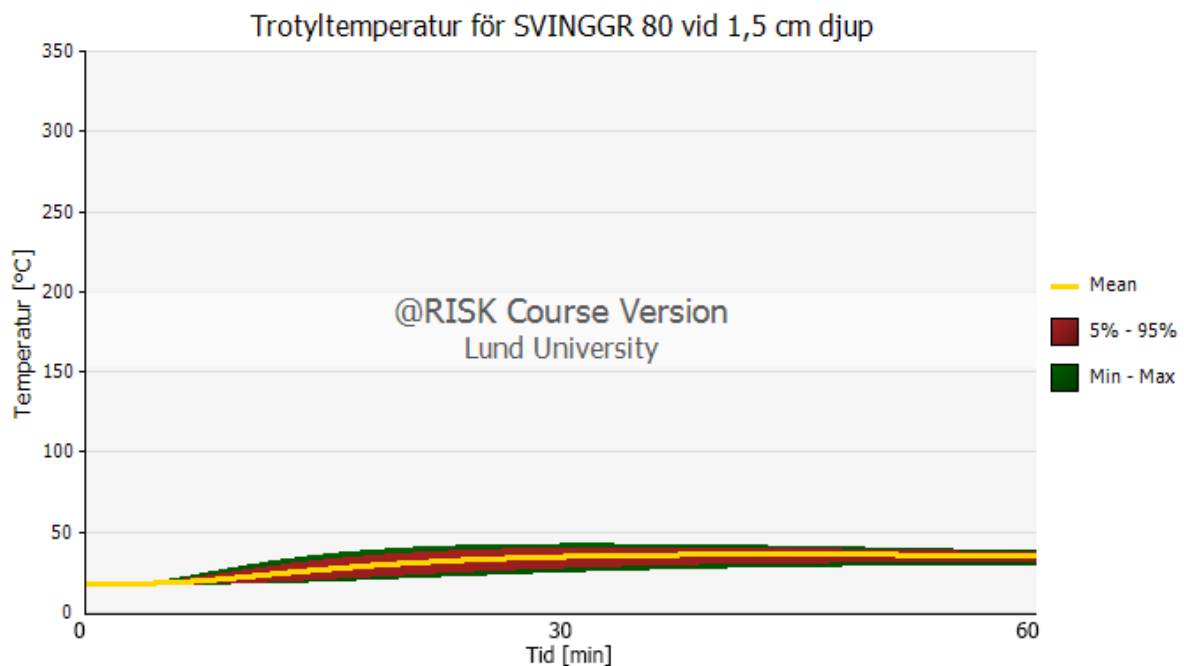
Figur 23 visar medeltemperaturen för trotylelementet närmst det översta stålelementet vid olika markdjup. Efter 15 minuter når trotylen dess högsta temperatur, då cirka 57 grader vid ett markdjup på 1,5 centimeter. Vid ökat markdjup sjunker temperaturen kraftigt, vid 15 centimeters markdjup är trotyltemperaturen i princip oförändrad under hela brandförloppet.

Trotyltemperatur för SVINGGR 80 vid olika djup



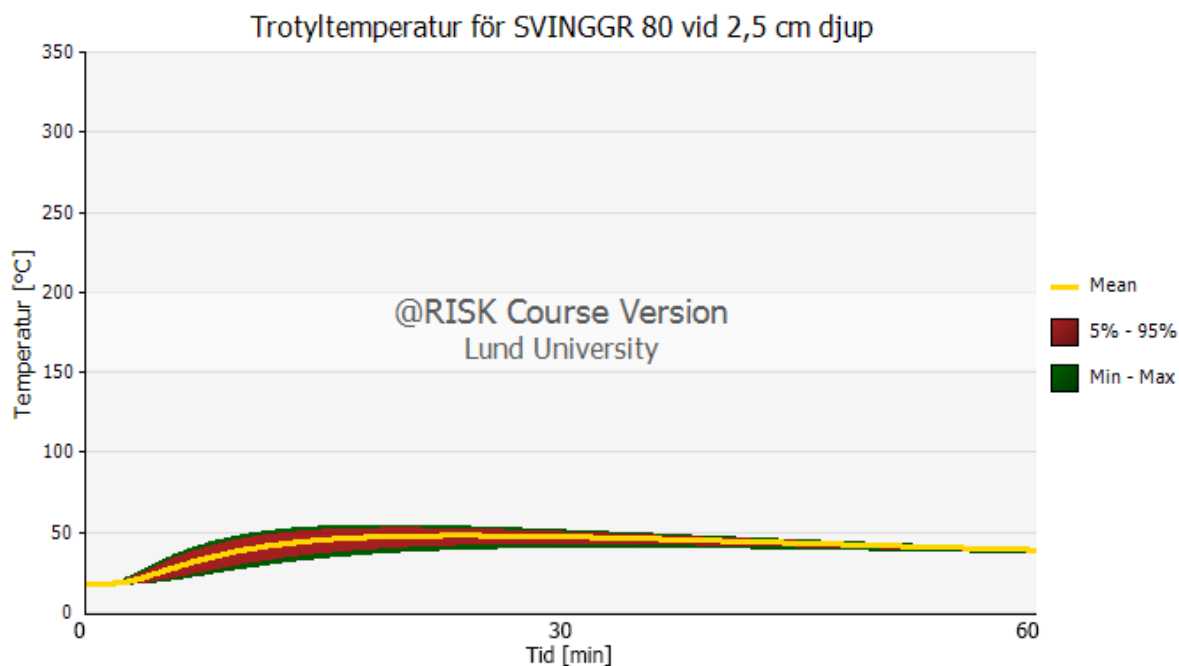
Figur 23. Temperaturen för trotyl i SVINGGR 80 vid olika markdjup.

Den högst beräknade temperaturen för SVINGGR 80 vid 1,5 cm markdjup blir 63 °C, vilket kan ses i figur 24. Temperaturspridningen är inte större än 20 °C vid någon tid, trots variationen i trotyls termiska egenskaper.



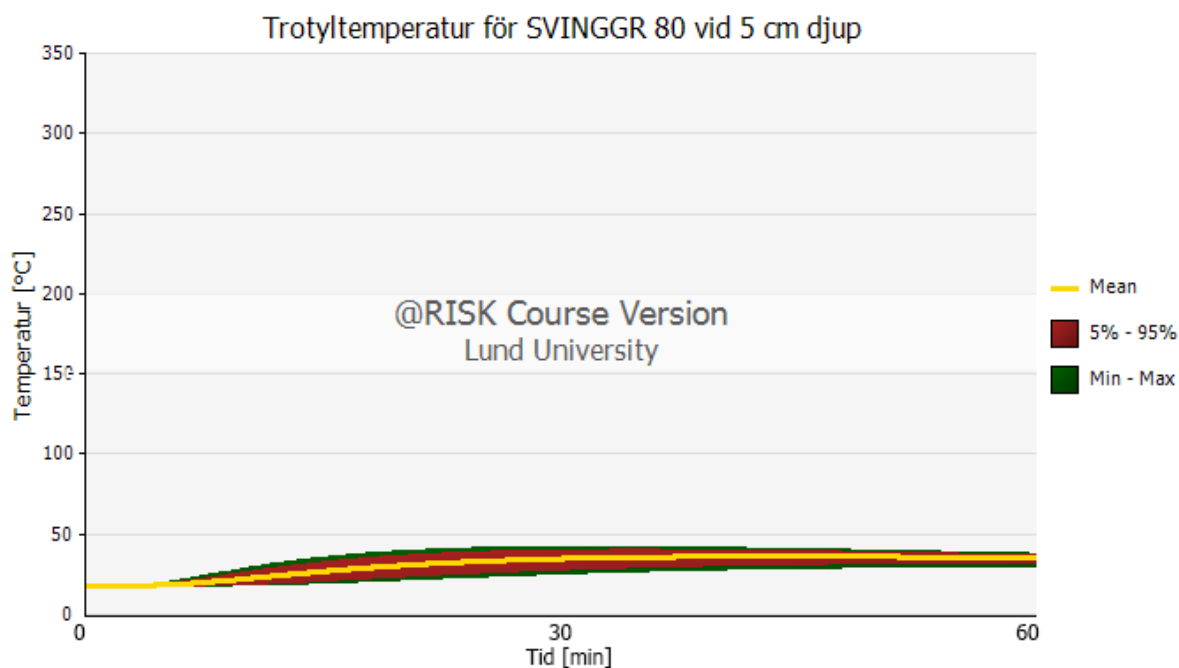
Figur 24. Spridningskurva för trotyltemperaturen närmast godset för sprängvinggranat 80 vid 1,5 cm markdjup.

Vid 2,5 cm under markytan överstiger temperaturen för trotyl aldrig 53 °C, se figur 25.



Figur 25. Spridningskurva för trotyltemperaturen närmast godset för sprängvinggranat 80 vid 2,5 cm markdjup.

Vid 5 centimeters djup håller granaten i förhållande till branden en konstant temperatur, där den maximalt beräknade temperaturen blir 37 °C. Informationen presenteras i figur 26.

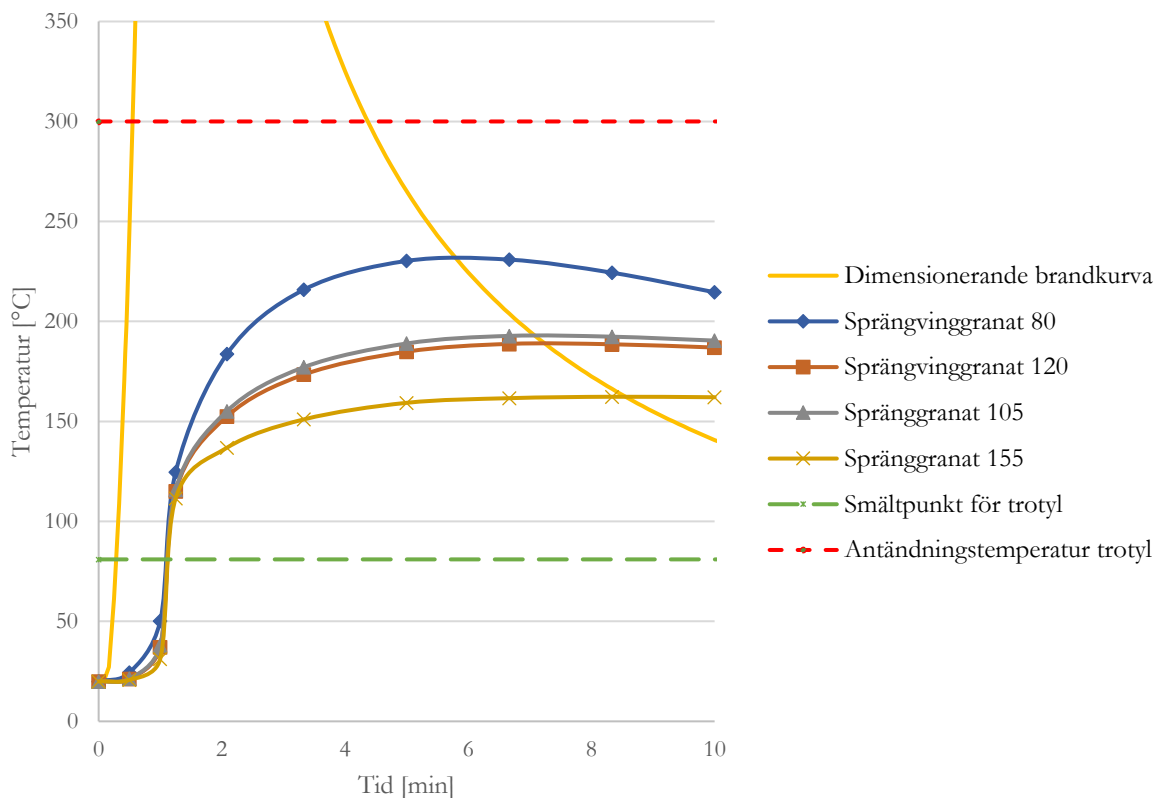


Figur 26. Spridningskurva för trotyltemperaturen närmast godset för sprängvinggranat 80 vid 5 cm markdjup.

6.2 Ovan markytan

För granater placerade ovan markytan och därmed är direkt exponerad för branden användes lumped heat capacity analysis för att beräkna dess temperatur. Teori och modelleringsantagande har presenterats i avsnitt 4.3.2 samt 5.4.1. Indata och en beräkningsserie presenteras i Bilaga C – Lumped Heat Capacity Analysis. Samtliga beräkningsserier är beräknade med varierande värmetransportskoefficienter. Energin från branden är tillräckligt för att få trotyl att smälta i samtliga granater, vilket sker vid 81 °C. Den högst beräknade temperaturen erhöles för sprängvinggranat 80 som efter 7 minuter når en temperatur på 231 °C. SVINGGR 120 och SGR 105 har ungefär samma termiska massa, vilket förklarade att deras kurvor är lika. Den största granaten, SGR 155, har störst termiska massa vilket syns i grafen då dess temperatur aldrig överstiger 175 °C under hela brandförloppet. Beräkningar genomfördes endast under brandens första 10 minuter, därefter sjönk brandens temperatur under granaternas. Detta återspeglas i resultatet då temperaturen för samtliga granater vid 10 minuter är längre än vid 8 minuter. All information presenteras i figur 27.

Granattemperatur som funktion av tid



Figur 27. Temperaturkurva för samtliga granater vid placering ovan markytan.

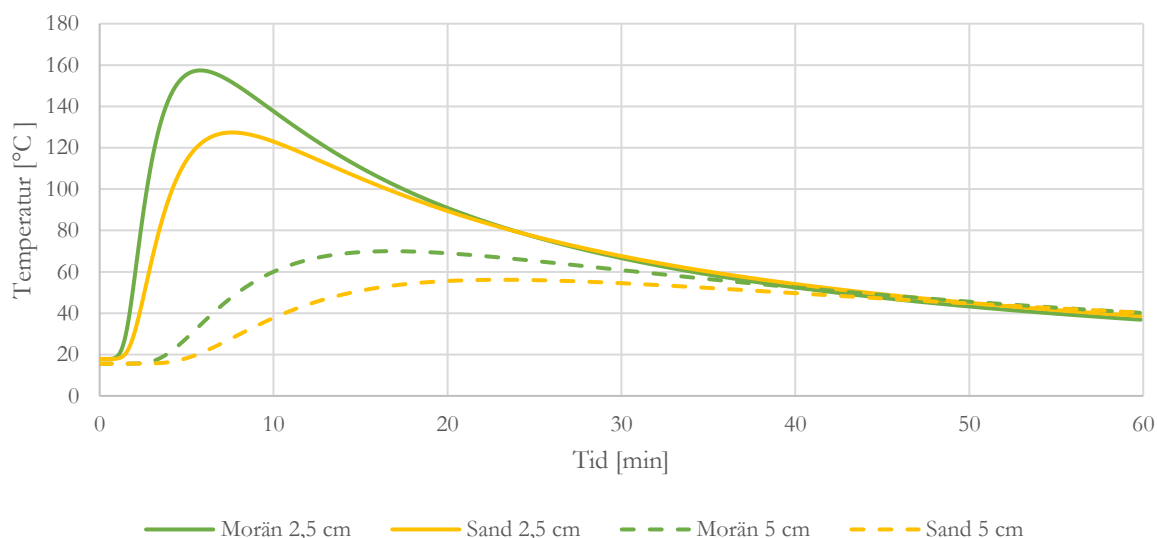
6.3 Känslighetsanalys

I detta avsnitt presenteras känslighetsanalysen som genomfördes för vissa parametrar. Vilka parametrar valdes presenterades mer utförligt i avsnitt 5.3.

6.3.1 Under mark

Vid jämförelse av temperaturkurvan för morän och sand så blev temperaturen konsekvent lägre för sand, vilket kan ses i figur 28.

Jämförelse mellan medelmarktemperatur för morän och sand

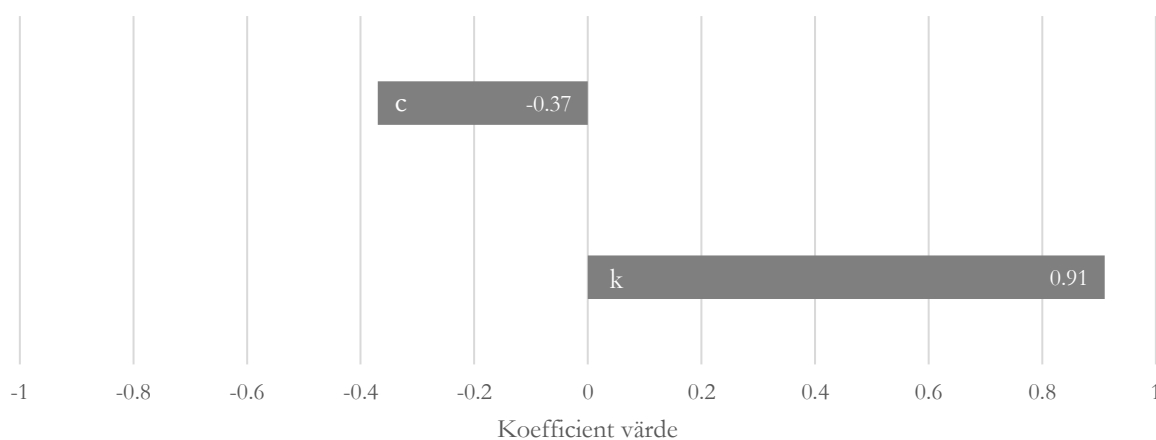


Figur 28. Jämförelse mellan morän och sands påverkan på medeltemperaturen.

@Risk kan även beräkna korrelationskoefficienten, resultatet från en sådan beräkning presenteras i figur 29. Resultatet visar att det nästan finns en linjär relation (+1) mellan temperaturökning och värmeledningsförmågan.

Känslighetsanalys

Korrelationskoefficient

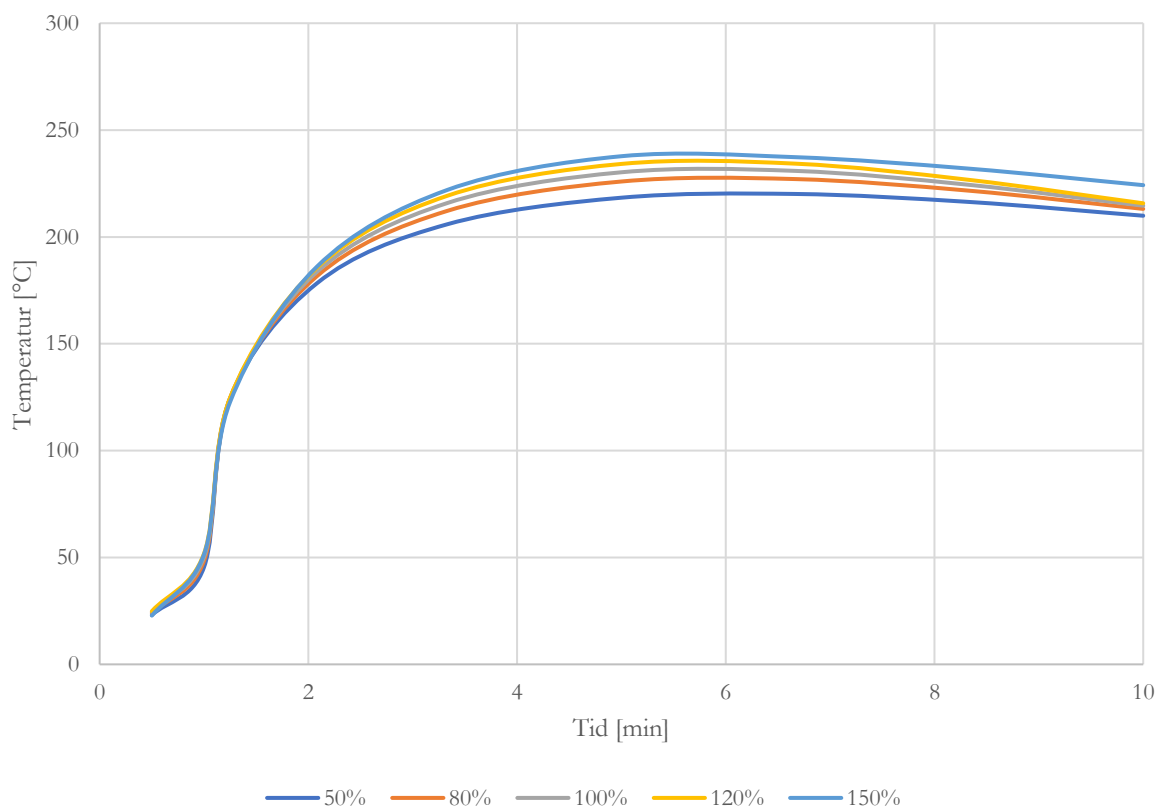


Figur 29. Korrelationskoefficient för värmeledningsförmåga och värmekapacitet i relation till temperaturen.

6.3.2 Ovan mark

Figur 30 visar resultatet från känslighetsanalysen där vindhastighet varierades. Varje linje visar en serie av beräkningar, 100% motsvarar 15 m/s som användes vid analysen. Figuren visar att resultatet inte är känsligt för förändringar i vindhastigheten då variationer på 100%-enheter resulterar en spridning på maximalt 10%. Beräkningarna har genomförts för SVINGGR 80.

Känslighetsanalys LHC



Figur 30. Känslighetsanalys kring vindspåverkan.

7 DISKUSSION

Glödbränder har medvetet exkluderats från analysen på grund av ett flertal anledningar. Förutsättningar för att en glödbrand ska uppstå är att det finns tillräckligt mycket brännbart organiskt material i marken samt rätt fuktförhållanden råder (Reardon, 2019). I målområdet är den dominerande jordarten morän vilket är en icke-organiskt jordart och därmed inte brännbar. Det är rimligt att anta att det ovanpå moränlagret finns ett tunt lager av organiskt material, torv eller humuslager. Tjockleken på det organiska jordlagret undersöktes tyvärr inte vid platsbesöket och att anta ett sådan tjocklek bedömdes introducera oproportionella osäkerheter i analysen.

I avsnitt 4.1 presenterades det att en glödbrand brinner med temperaturer upp till 500–700 °C vid väldigt långsamma spridningshastigheter. Den dimensionerande brandkurvan överstiger glödbrändernas temperatur men varaktigheten är kortare då glödbränder kan fortgå i dagar (Reardon, 2019). Glödbränder är väldigt känsliga förbränningsförhållanden vilket kräver rätt förhållanden kring bränslet och syretillförsel. Porositeten i det glödande materialet måste vara sådan att syretillförseln inte hindras samtidigt som värmeförlusten inte blir för stor. Det är de isolerande egenskaperna från bränslet som möjliggöra glödning vid de förhållandevis låga temperaturerna (Brabrauskas, 2003). Detta medför att värmetransporten i marken troligtvis inte blir lik den från en ytbrand då värmen bibehålls lokalt kring förbränningszonen. När en glödbrand kommer i kontakt med en granat kommer granaten fungera som en värmebank. Detta kan resultera i att glödbranden inte har tillräckligt med energi för att fortsätta. Glödbränders känsliga värmebalans och osäkerheterna kring bränsletillgången gjorde att det inte kunde beräknas på ett tillfredställande sätt vilket resulterade i att det exkluderas.

Vid beräkningar av värmetransport ner i marken antogs ett helt homogent jordlager utan förekomst av större stenar eller block. Huruvida en sten påverkar värmetransporten till granater har inte undersökts mer än med logisk argumentation. Om en granat träffar ett block vid markytan kommer granaten explodera. Om block/berg istället finns under markytan så kan granaten teoretisk efter nedslag komma i kontakt med detta. Vid direktkontakt mellan granat och block/berg sker ett ökat värmeutbyte då bergarters värmeledningsförmåga kan vara upp till en faktor 4 större än den för morän (Sundberg, 1991). I förhållande till ståls ledningsförmåga är den för block/berg försumbar. Värmeöverföringen är beroende av kontaktytan mellan block/berg och granaten. Block/berg har försumrats i beräkningarna av primärt två anledningar: 1) Morän kan vara en jordart med hög förekomst av block/berg, men att inkludera detta explicit i analysen bedömdes inte höja resultatets dignitet. 2) Morän är en jordart som per definition innehåller alla kornfraktioner. Detta medför att block är inkluderade i de termiska egenskaperna för morän.

I Beadles (1940) artikel presenterades det att vattenhalten i sand påverkade värmetransporten. Resultatet från artikeln visade att jorden med högre fukthalt hade ett större termiskt motstånd och värme transporterades långsammare. Mängden vatten som finns i jorden beror på grundvattenytans placering och jordart, ovan grundvattenytan är vattenmängden beroende av porositet i jordarten (Svensson, 2012). Samtliga beräkningar i denna rapport har genomförts ovan grundvattenytan, detta innebär att jorden inte är vattenmättad. Morän har bra vattenhållande egenskaper och därför varierar moräns termiska egenskaper kraftigt vid olika fukthalten. Variationen hanterades med en likformig fördelning. Detta bedömdes vara ett bra sätt att hantera osäkerheten för varierande fuktförhållanden. Genomförda beräkningar försummade förångning av vatten samt förändring av moräns och vattens termiska egenskaper vid förhöjda temperaturer. Då beräkningarna genomfördes över ett stort temperaturintervall så hade detta varit bra att inkludera temperaturvarierande egenskaper för att bättre representera verkliga förhållande. Detta genomfördes inte på grund av brist på data för morän. Vatten modellerades som en del av moränens egenskaper och därför exkluderades detta. Det är också därför som förångningsentalpin för vatten exkluderas. Vid verkliga förhållande så kommer vattnet i marken förångas vid 100 °C. Vattenången kommer sedan stiga upp mot ytan (Beadle, 1940). Detta var inte möjligt att modellera med vald beräkningsmodell och hade då krävt en mer avancerad beräkningsmodell.

Efter en kort muntlig övervägning med handledaren bedömdes det att tiden för inläring och förståelse av en sådan modell inte kunde motiveras av det resultat som hade genererats. Därför valdes det att helt exkludera vattens fasförändring. Indata som användes inkluderade de termiska egenskapernas spridning vid olika vattenhalter ovan grundvattenytan. Som presenterades i resultatet var det främst de översta 5 centimeter där temperaturen överstiger 100 °C. Genomförda beräkningar förutsätter att branden sker under sommarmånaderna då det är torrare. Det är alltså rimligt att anta att det översta jordlagret har en låg fuktighet. Detta medför att resultatet från värmetransportberäkningar inte borde skilja avsevärt om vattenhalten mer noggrant hade analyserats.

Vid modellering av granaterna användes i båda fallen en geometrisk och termisk förenkling. Som kritiskt gränsvärde valdes antändningstemperaturen för trotyl vilket är ett statiskt värde. När en granat exponeras för värme så kommer värmen att sprida sig i granathöljet av stål. Ståls värmeledningsförmåga är väldigt hög och temperaturdifferensen i kroppen kan antas vara låga (ingen temperaturgradient uppstår). I ytterkanterna av den fasta trotylkakan kommer temperaturen höjas i takt med granathöljets. När temperaturen i trotylen når 81 °C börjar det att smälta. Trotyls värmeledningsförmåga är väldigt låg, detta innebär att gradienten i trotylkakan kan bli stor. Den låga värmeledningsförmågan i kombination av snabb värmeförsel från granathöljet medför att det som tidigare var en stabil kaka av trotyl nu blir en hybridblandning av fast och flytande i ytterkanterna. Värmen som sedan tillförs hybridblandningen kommer bidra till att mer trotyl smälter samt höja temperaturen i den flytande massan. Hur mycket av massan som är flytande beror på mängden energi som har tillförts. Fram till 96 °C finns det fortfarande kristaller av TNT kvar i blandningen. Vid 200 °C börjar TNT att termiskt brytas ner och det sker en tryckhöjning inne i granaten. Vid 300 °C kan gaserna termiskt antändas vilket resulterar i en deflagration/detonation. För vissa explosivämnen så påverkar uppvärmningshastigheten den termiska antändningstemperaturen. För TNT har detta liten eller ingen effekt och därför kan 300 °C betraktas som en konstant (Wang, Cao, Ning, & Zhao, 2013).

Att endast använda det statiska värdet 300 °C som kritiska gränsvärde för antändning medför att risken kanske underskattas. I genomförda beräkning tas ingen hänsyn till den energi som frigörs från TNT när det bryts ner eller energi som krävs för fasövergång från fast till flytande. Ingen hänsyn tas heller till temperaturgradienten eller lokala ”hotspots” som kan uppstå i anslutning till granatkroppen. Teoretiskt kan små mängder trotyl förångas och antändas, energin som då frigörs är tillräckligt för att antända hela trotylkakan.

Vid val av beräkningsmetod för att beräkna temperaturen för granaten ovan markytan konstaterades det att det fanns två beräkningsmetoder, lumped heat capacity analysis eller en FEM-modell. Valet föll på lumped heat capacity analysis på grund av modellens enkelhet. Metoden är lätthanterlig, välanvänd av författaren och förhindrar ”black box syndrome”. Vald metod tar hänsyn till strålning från de omgivande brandgaserna samt värmeförloppet via konvektion. Den tar dock inte hänsyn till ledning från markytan. Beräkningsmodellen som användes har i slutet av arbetet bedömts som inte tillräckligt detaljerad för att ge exakta resultat och ta hänsyn till granaters komplexitet, framförallt med avseende på hur trotyl reagerar vid värmexponering. Däremot har den bedömts som tillräckligt detaljerad för att beräkna temperaturen i granatkroppen då denna är tillverkad av stål och temperaturen i kroppen kan därför antas vara nästan likformig på grund av ståls goda värmeledningsförmåga.

För lumped heat capacity analysis är värmetransportkoefficienten en kritisk variabel som kraftigt påverkar resultatet. När värdet för variabeln skulle väljas fanns det två metoder, antingen så beräknades värmetransportkoefficienten vid varje tidsintervall eller så valdes ett statiskt värde. Det valdes att beräkna talet då det bedömdes ge ett mer verklighetstroget resultat. Om det istället hade valts ett statiskt medelvärde hade värmeöverföringen varit underskattad vid höga temperaturen och överskattad vid låga. Det är framförallt det tidiga skedet av brandförloppet som analyserats, därför är det viktigt att indata som användes var tidsanpassad. Värmetransportkoefficienten beräknades för en sfär, precis på samma sätt som granaterna modellerades, se avsnitt 5.4.2. Värdet vid varje tidsintervall för sprängvinggranat 80 presenteras i Bilaga C – Lumped Heat Capacity Analysis. Resultatet i bilagan visar att värmetransportkoefficienten är högre i början när temperaturskillnaden mellan de strömmande gaserna och granaten är stor. Det högsta beräknades

värmetransportkoefficienten blev $184 \text{ W/m}^2\text{K}$ jämfört med det redovisade maximala värdet $120 \text{ W/m}^2\text{K}$ från Butler (2010). Värmetransportkoefficienten beräknades med en fast strömningshastighet, vilket var 15 m/s . Det råder stora osäkerheter kring detta värde. Värdet är hämtat från Butler (2010) och uppmättes vertikalt i en skogsbrand 9 meter ovan markytan. Om detta värde är realistisk nere vid branden är svårt att avgöra. Den termiska expansionen kring brandens framfart kan potentiellt medföra att värdet är för lågt samt turbulens påverkar värmeöverföringen. Värdet bedömdes som ett bra utgångsvärde på grund av osäkerheterna som råder. Känslighetsanalysen visade att värdet inte påverkade resultatet mycket, en ökad vindhastighet på 50% ökade den högst beräknade temperaturen med $3,5 \%$. Känslighetsanalysen visade inte om 15 m/s var ett bra utgångsvärde, utan endast hur resultatet påverkades av en variation i indata.

Vid beräkning av värmeöverföringen från strålning användes en förenklad modell, som beskrivs i avsnitt 4.3.1, modellen utgår ifrån att synfaktor och emissivitet för både eld och granat är 1. Antagandet för synfaktor bedöms som rimligt för en skogsbrand då den kommer omsluta granaten. Emissivitet är materialberoende beskriver hur mycket strålningsenergi som utsänds vid en viss temperatur jämfört med svart-kroppsstrålning. För en brand beror emissiviteten på hur mycket sot som bildas i flammen, vid en fibrös skogsbrand bildas mycket sot. Ståls emissivitet är temperaturberoende och ökar vid stigande temperatur (Sadiq, Wong, Tashan, Al-Mahaidi, & Zhao, 2013). Inom temperaturintervall som granaten uppnådde sker ingen större förändring av emissiviteten. Antagandet att emissiviteten är 1 är konservativt och medför kanske att värmetransportkoefficienten överskattas.

Resultatet från värmetransportberäkningarna i mark bedöms vara en bra utgångspunkt för framtida forskning. Beräkningsmodellen är vanligt förekommande vid beräkning av temperatur i väggar, i Bilaga E – Jämförelse med annan värmetransportmodell beräknades temperaturen för olika vanligt förekommande byggnadsmaterial när dessa exponerades för den dimensionerade brandkurvan, se figur d 1 och figur d 2. Skillnaden mellan moräns termiska egenskaper och byggnadsmaterialen är förhållandevis liten. Framförallt är det tegel som är likt morän, vilket är föga förvånande då tegel är tillverkad av bränd lera. Detta förstärker resultatet då värmevägen från branden inte genererade märkbara temperaturförändringar efter 20 centimeter. Jämförs detta med en kompakt vägg av valfritt byggnadsmaterial så kan man intuitivt dra samma slutsats.

Vid jämförelse av temperaturkurvan vid 2,5 centimeters djup för endast morän och för SVINGGR 80 så är det är medeltemperaturdifferensen nästan $100 \text{ }^\circ\text{C}$ vid högsta temperaturen. Skillnaden mellan de två resultaten är att temperaturen för sprängvingranat presenterar trotyltemperaturen när överkanten av granatens första skivan är placerad vid 2,5 centimeter. Tjockleken på den modellerade stålskivan är godstjockleken, vilket för SVINGGR 80 är 8,9 mm. Trotylelementet vid beräkningen var 1 cm tjockt. Trots den extra termiska massan är det förvånande att skillnaden blir så stor. En förklaring kan vara att värmevägen som transporteras från branden ner i marken inte har lång uthållighet. Detta medför att värmevägen som skapas totalt sett inte har tillräckligt uthållighet för att värma upp stålet. Stål har en volymetrisk värmekapacitet som är nästan en faktor 2 större⁵ än den för morän. Detta medför att det krävs dubbelt så mycket energi för att höja temperaturen en grad för 1 m^3 stål jämfört med morän. Vidare är värmekapaciteten för trotyl högre än moräns, vilket också kräver mer energi för en temperaturökning.

Brandkurvan valdes utifrån den information som hämtades vid litteraturstudien, det finns alltså ingenting förutom en kvalitativ bedömningen som tyder på att ett brandförlopp blir som det modellerade. Det som finns är att brandförloppen som presenterades i litteraturen är baserade på fullskaliga skogsbränder. I början av arbetet var avsikten att använda en beräkningsmetod för att skapa en brandkurva, tyvärr hittades endast den som presenterades i Weber et al. (1995) och som tidigare nämnt så bedömde författarna att det deras modell inte går att applicera som ett förutsägande verktyg. Det var också tänkt att applicera Van Wagners (1977) kronspredningsmodell som ett steg i temperaturberäkningen. Trädens placering och det ojämna

⁵ Den volymetriska värmekapacitet för stål är $3,49 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. Värdet är en produkt av densiteten och värmekapaciteten som presenteras i Tabell 9.

kronlager som fanns gjorde att det inte bedömdes höja arbetets kvalité och därför användes den inte. Förhoppningen var att det skulle vara mer sammanhängande skog.

Kvar blev metoden som sedan användes. Grundtanken vid valet var att kurvan skulle representera ett realistiskt brandförlopp. Vid platsbesöket framgick det att skogen vid målområdet är av olika trädslag, vilket kan ses i avsnitt 3.3. Tumregel vid skogsbrand är att lövskog dämpar brandintensitet medan renodlad tallskog höjer intensiteten (Hansen, 2003), vilket förstärker argumentation ytterligare att kurvan är rätt vald. Santin et al. (2016) kurva är framtagen i tallskog, hade deras maxvärden använts så hade brandkurvan varit överdimensionerad vid de givna förutsättningarna.

Vid jämförelse av vald kurva och de kurvor som presenterades i Edlund (1999), se figur 3, så är den valda kurvan ett mindre utmanade brandförlopp. Detta är egentligen föga förvånade, Edlunds kurva är framtagen vid oerhört god bränsletillgång och delar likheter med en kontinuerligt brinnande lägereld. Den valda brandkurvan i detta arbete beskriver istället temperaturen i en punkt när en brandfront passerar. Brandfronten har redan innan den anländer till punkten byggt upp moment och förbränningsförutsättningar. Detta medför att temperaturtoppen blir kortare då förbränningen av tillgängligt bränsle sker väldigt fort. I jämförelse blir Edlunds brand mer konstant då den startas och får utvecklas över en längre tid på samma statiska område.

Den bäst anpassade brandkurvan hade erhållits genom att genomföra försök på skjutfältet. Idéen avfärdades tidigt på grund av den omfattade planering och samverkan mellan involverade aktörer som hade krävts. Behovet finns fortfarande då det vid litteratursökning inte hittades någon svensk artikel där storskaligt skogsbrandsförlopp undersökts. Att genomföra ett sådant försök i kombination med granatsäkerhet, likt försöken genomförda av Edlund, bedöms att vara ett framtida examensarbete för en brandingenjör tillsammans med någon som besitter goda kunskaper om granater.

Utöver de granattyper som detta arbete har valt ut att fokusera ska det finnas mer finkalibrig ammunition vid skjutfältet enligt Wassborg. Som presenterades i Skriudalen, Fykse och Dullum (2009) finns det en risk att dessa går till verkan när de exponeras av värme från en engångsgrill. Att värmedosen som skapas från en skogsbrand skulle vara lika stor eller större än den från en engångsgrill råder det inga tvivel om. Skriudalen et al. undersökte också splittrrisken när finkalibrig ammunition exploderar. De fann att personer som vistas inom ett rimligt grillavstånd från engångsgrillen riskerar allvarliga skador och att dödsfall inte kunde uteslutas. Exakt hur detta ska appliceras på förhållanden som råder vid Skillingaryds skjutfält är svårt med hänsyn på riskavstånd och riskbild, men det finns som tidigare nämnt inga tvivel att värmedosen är tillräcklig för att antända ammunitionen.

I resultatet från beräkning under markytan presenterades inte grafer för samtliga granater. Den första granaten som temperaturen beräknades för var SVINGGR 80, för vilken medeltemperaturen med till tillhörande spridningskurvor presenteras. Resultatet visar tydligt att det inte fanns någon risk för detonation i marken. På grund av de argument som redan presenteras tidigare i diskussionen så kommer temperaturen vara lägre för de andra granaterna som har en större termisk massa, därför redovisas inte fullständiga resultat för resterande granater. Liknande argument hade varit möjligt att använda vid presentation av granater placerade ovan mark men för dessa var temperaturintervallet mellan de olika granaterna lägre, därför presenterades alla.

8 SLUTSATS

För arbetet har det funnits tre mål, dessa var att analysera OXA:s beteende vid brandexponering, förstå hur värmetransporten sker när OXA utsätts för brand samt att skapa ett underlag för räddningstjänsten i Vaggeryds kommun i deras fortsatta arbete med insatsplanering vid Skillingaryds skjutfält.

Det första var att analysera OXA:s beteende vid brandexponering. Litteraturstudien och utförda beräkningar kommer fram till olika resultat. Samtliga tre artiklar drar slutsatsen att brandexponerad ammunition kan detonera. I en av dessa artiklar utsätts granater för en skogsbrandsliknande situation vilket är det scenario som är mest jämförbart med detta arbete. Vid samtliga beräkningar i detta arbete uppnår aldrig explosivämnet den temperatur som krävs för termisk antändning. Det antas att detta beror främst på valet av modelleringsmetod för granaterna.

Det andra målet var att förstå värmetransporten när OXA utsätts för brand. Detta målet har delvis uppnåtts. Fokus för värmetransporten har framförallt varit att förstå hur värmetransporten sker från branden fram till granaten. För granater placerade ovan markytan har värmetransporten beräknats för konvektion och strålning och för granater placerade under mark har värmetransporten beräknats för konduktion. Metodval och beräkningsmetodik har utifrån kunskapsförutsättningar och arbetsomfång varit tillfredsställande. För värmetransport inom granaten har två alltför generella modeller använts och därför kan detta mål inte bedömas vara uppnått. För att uppnå målet med värmetransport inom OXA:n hade en mer detaljerad modell behövt nyttjas. Modellen hade behövt tagit hänsyn till smältning, exotermiska processer samt modellerad värmetransporten kring granatens hölje bättre. Det är också så att glödbränder hade behövts hanteras på ett mer kvantitativt sätt för att ge ett helhetsperspektiv kring värmeutvecklingen från en skogsbrand.

Det tredje målet har varit att skapa ett underlag för räddningstjänsten i Vaggeryds kommun. Detta mål bedöms vara uppfyllt. Arbetet har sammanställt relevant litteratur som sedan kompletterades med beräkningar anpassade efter rådande förutsättningar vid Skillingaryds skjutfält. Analysen har genomförts för att förstå rådande risker med brandexponerad OXA vid Skillingaryds skjutfält och inte som en dimensionering för arbetsmiljö vid skogsbrandsläckning. Då det råder stor osäkerhet kring beräkningsmetodernas applicerbarhet och indatas dignitet kan beräkningsresultatet inte användas som beslutsunderlag för att förbise risken med brandutsatt OXA. Slutsatsen är att det föreligger risk med brandexponerad ammunition vilket baseras på litteraturstudien som genomfördes.

En sista slutsats är att analysen som har genomförts med största sannolikhet är den första i sitt slag, vilket innebär att det får anses som ett försök att bryta ny mark.

9 FRAMTIDA FORSKNING

Då detta arbete får betraktas som i viss mån en pilotstudie har det under arbetet dykt upp frågeställningar och metodval som hade varit intressant att applicera på Skillingaryds skjutfält. Dessa frågeställningar och idéer sammanställs i följande kapitel.

9.1 Fullskalig undersökning av skogsbrand

Som tidigare nämnts vid ett flertal tillfällen så finns det ett behov i det fortsatta arbetet av denna typ av analyser att förankra skogsbränders beteende med hjälp av experiment. Faktorer som hade varit intressanta att undersöka är temperatur, konvektion, strålning och värmeöverföring mot mark. Förslagsvis genomförs experimentet tillsammans med flera olika aktörer för att undersöka många faktorer samtidigt.

9.2 Detaljerad beräkningsmodell

Asante et al. (2015) modellerade smältning och antändning för trotyl i en 15,5 centimeters granat. Försöken genomfördes för att undersöka hur detta skedde vid så kallad ”cook off” test. Det hade varit intressant att använda deras modeller eller en snarlik för att undersöka hur en granat påverkas av mer skogsbrandslika förhållanden. Detta hade sedan kunnat jämföras med resultatet från avsnitt 9.1

9.3 Kostnad-nytta analys för förebyggande åtgärder

Om det skulle genomföras åtgärder för att förbättra släckningsförhållanden är det viktigt att dessa genomförs så att släckningen underlättas samtidigt som lösningarna som implementeras förblir kostnadseffektiva. Kostnad-nytta-analyser är ett verktyg som lämpar sig väl vid en sådan situation då det är skattepengar som kommer finansiera åtgärderna. Analysen skulle kunna genomföras likt den som Skogum (2013) genomförde för räddningstjänstens beredskap vid vattenräddning.

KÄLLOR

- Akhavan, J. (2004). *The Chemistry of Explosives: Edition 2*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Asante, D. O., Kim, S., Chae, J., Kim, H., & Oh, M. (2015). CFD Cook-Off Simulation and Thermal Decomposition of Confined High Energetic Material. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 699-705.
- Bailey, A. W., & Anderson, M. L. (1980). Fire temperatures in grass, shrub and aspen forest communities of central alberta. *Journal of range management* 33, 37-40.
- Beadle, N. (1940). Soil Temperatures During Forest Fires and Their Effect on the Survival of Vegetation. *Journal of Ecology*, 180-192.
- Beer, T. (1991). The interaction between wind and fire. *Boundary Layer Meteorology*, 287-308.
- Bolsover, A., Skramstad, E., & Lyon, A. (u.d.). *Uncertainty in QRA*. Presentation at the 7th Annual Conference on Offshore Installations, DNV Norway.
- Brabrauskas, V. (2003). *Ignition handbook*. Issaquah: Fire science publishers.
- Brandteknik. (1990). *Analytisk lösning av värmeledningsekvationen*. Lund: Institutionen för brandteknik.
- Butler, B. (2010). *Characterization of convective heating in full scale wildland fires*. Missoula: US Forest Service.
- Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. *Forest fire: Control and use*, 61-90.
- Davidsson, G., Haeffler, L., Ljungman, B., & Frantzich, H. (2003). *Handbok för riskanalys*. Karlstad: Räddningsverket.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics: Third Edition*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Edlund, L. (1999). Brandprovning avseende OXA. *VAPEN:14925:44040*. Försvarets materielverk.
- Fjällgren, M., & Löfberg, E. (2016). Försök med värmeledning i mark. *FM2016-2211:1*. Försvarsmakten.
- Folly, P. (2004). Thermal Stability of Explosives. *Chimia*, 394-400.
- Försvarsmakten. (den 06 09 2019). *Ordlista*. Hämtat från Försvarsmakten:
<https://www.forsvarsmakten.se/sv/ordlista/#/word/oxa> den 06 09 19 Kl 09:10
- Frandsen, W. H. (1971). Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy. *Combustion and flame*, 9-16.
- Hansen, R. (2003). *Skogsbrandsläckning*. Karlstad: MSB.
- Heward, H. (2019). *Surface fire*. Springer.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2001). *Fundamentals of heat and mass transfer 5.ed*. Wiley.
- Kanury, A. (1975). *Introduction to Combustion Phenomena*. New York: Gordon and Breach, Science Publisher, Inc.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. CRC Press LLC.
- Koorevaar, P., Menelik, G., & Dirksen, C. (1983). Heat Transport in Soil. *Development in soil science*, 193-207.
- Körner, S., & Wahlgren, L. (2006). *Statistik datanalis, 4:e upplagan*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Länstyrelsen i Jönköpings län. (2016). *Bevarandeplan för Natura 2000-området Skillingarydsfältet*. Jönköping: Länstyrelsen i Jönköpings Län.

- McCaffrey, B. J. (1979). *Purely buoyant diffusion flames: some experimental results*. National bureau of standards.
- Paysen, T. E., Ansley, J. R., Brown, J. K., Gottfried, G. J., Haase, S. M., Harrington, M. G., . . . Wilson, R. C. (2000). Chapter 6: Fire in western shrubland, woodland, and grassland ecosystems. i USDA, *USDA Forest Service Gen.Tech. Rep* (ss. 121-159). USDA.
- Raupach, M. (1990). Similarity analysis of the interaction of bushfire plumes with ambient winds. *Mathematical and computer modelling*, 113-121.
- Reardon, J. (2019). *Ground Fire*. Springer.
- Sadiq, H., Wong, M., Tashan, J., Al-Mahaidi, R., & Zhao, X.-L. (2013). Determination of steel emissivity for the temperature prediction of structural steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 167-173.
- Santín, C., Doerr, S. H., Merino, A., Bryant, R., & Neil, L. J. (2016). Forest floor chemical transformations in a boreal forest fire and their correlations with temperature and heating duration. *Geoderma*, 71-80.
- Scott, J. H., & Robert, B. E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. United States Department of Agriculture.
- Sejlitz, I. (2009). *Explosivämneskunskap*. Karlskoga: KCEM AB.
- Skogum, A. (2013). *Kostnadsnyttoanalys - Räddningstjänstens beredskap vid vattenräddning i Sverige*. Karlstad: Karlstad Universitet.
- Skriudalen, S., Fykse, H., & Dullum, O. (2009). Testing av blindgjengere fra 12,7 mm og 20 mm MP-ammunisjon mot åpen ild – risiko ved utilsiktet oppvarming. *FFI-rapport 2009/01429*. Norwegian Defence Research Establishment (FFI).
- SMHI. (2019). *Meteorologiska observationer*. Hämtat från SMHI.se: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airTemperatureMeanMonth,stations=all,stationid=74180>
- SMHS. (u.d.). *Skillingaryds skjutfält*. Hämtat från Smhs.com: http://smhs.com.dinstudio.se/gallery_98.html
- Sundberg, J. (1991). Termiska egenskaper i jord och berg. *SGI-INF--91/12--SE*. Statens geotekniska institut.
- Svensson, C. (2012). *Kompendium i teknisk geologi AK*. Lund: Avdelningen för teknisk geologi, LTH.
- Sveriges geologiska undersökning. (2019). *SGUs kartvisare*. Hämtat från SGU.se: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-1-miljon.html>
- Taylor, S. W., Wotton, B., Alexander, M., & Dalrymple, G. (2004). Variation in wind and crown fire behaviour in a northern jack pine - black spruce forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1561–1576.
- Thode, A., & Hunter, M. (den 06 01 2016). *World of Wildland Fire: Introduction to Fire Behavior*. Hämtat från Youtube: <https://youtu.be/SB4pk91yq24?t=341>
- Thomas, P. (1967). Some aspects of the growth and spread of fire in the open. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 139-164.
- USDA Forest Service. (u.d.). *Fire terminology*. Hämtat från National Park Service : <https://www.fs.fed.us/nwacfire/home/terminology.html>
- Van Dam, R. L., Borchers, B., & Hendrickx, J. M. (2005). Strength of landmine signatures under different soil conditions: implications for sensor fusion. *International Journal of Systems Science*.

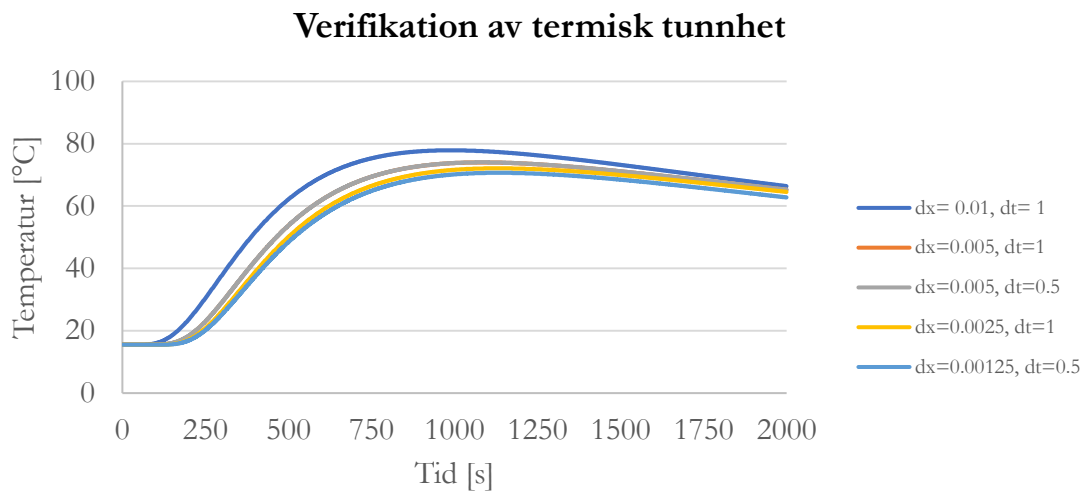
- Van Wagner, C. (1977). Conditions for the start and spread of crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 23-34.
- Wang, C., Cao, X., Ning, J., & Zhao, H. (2013). Numerical computing of heat safety of TNT in cook-off test. *Disaster Advances* , 44-50.
- Weber, R., Gill, A., Lyons, P., Moore, P., Bradstock, R., & Mercer, G. (1995). Modelling wildland fire temperatures. *CALMScience Supplement 4* , 23-26.
- Weise, D. R., Cobian-Iñiguez, J., & Princevac, M. (2018). *Surface to Crown Transition*. Cham, Schweiz: Springer.
- Zumdahl, S. S. (1992). *Chemical principles*. D.C. Health and company.

BILAGA A – VERIFIKATION AV TERMISK TUNNHET

Att temperaturen för den första cellen sätts till brandgasers temperatur medför vissa modelleringssvårigheter. Enligt Drysdale (2011) måste det säkerställas att varje element är termiskt tunt, detta verifieras normalt via Biots tal. Det antagna randvillkoret att första noden har brandgasernas temperatur medför att inget konvektionstal, h_k , väljs, därför kan inte Biots tal beräknas. För att verifiera termisk tunnhet användes istället en annan metod med två kriterier där båda behöver vara uppfyllda. Metoden valdes efter dialog med Nils Johansson, biträdande universitetslektor vid avdelningen för brandteknik, Lunds universitet. Kriterierna är följande:

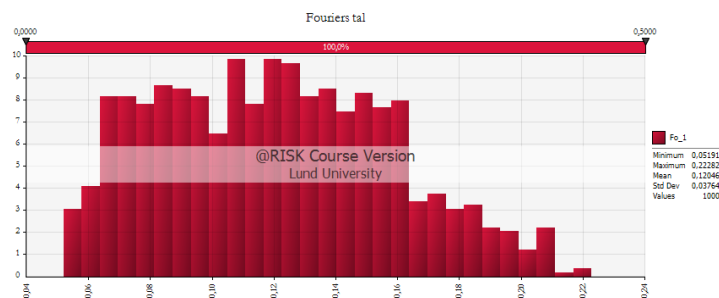
1. Fouriers tal ska vara mindre än 0,5.
2. Tjockleken på varje element, dx samt tidsintervallet, dt halveras tills att det inte längre syns någon förändring av resultatet.

Resultatet av metoden presenteras i Figur A 1. Figuren visar temperaturen vid markdjupet 0,05 m i enbart morän utsatt för den dimensionerade temperatur-tid kurvan. Skillnaden mellan $dx = 0,0025, dt = 1$ och $dx = 0,00125, dt = 0,5$ är så liten att det inte föreligger någon anledning att använda den finare upplösningen av element, därför användes $dx = 0,0025, dt = 1$ vid värmetransportberäkningar. Fördelen med grövre upplösning är att det inte kräver lika mycket beräkningskraft. Den brandgula linjen syns ej i figuren, detta då den ligger under den gråa.



Figur A 1. Beräknad temperatur vid djupet 5 centimeter under markytan vid varierande dx och dt .

Fördelningen över Fouriers tal presenteras i Figur A 2.



Figur A 2. Fördelningen av Fouriers tal för värmetransportberäkning vid $dx=0,0025$ och $dt=1$.

BILAGA B – DATORPROGRAM

@Risk

@Risk (version 7.6) utvecklat av Palisade är ett tillägsprogram till Microsoft Excel. Programmet använder en Monte Carlo modell för att välja värden i den statistiska fördelningen. Denna process upprepas sedan ett bestämt antal iterationer och resultatet sammanställs av programmet. Resultatet kan sammanställas i grafer samt rapporter med kompletterande känslighet- och variabelanalys.

Mer information kring programmet finns på Palisades hemsida: <https://www.palisade.com/risk/>

BILAGA C – LUMPED HEAT CAPACITY ANALYSIS

I denna bilaga presenteras resultatet från beräkningar som genomfördes vid lumped heat capacity analysis. I Tabell C 1 presenteras de värden som användes för beräkningar av ”granatämnet” och tillhörande termiska och geometriska egenskaper.

Tabell C 1. Beräknade egenskaper för samtliga granater.

| | Beteckning | Sving 80 | Sving 120 | Spräng 105 | Spräng 155 | Enhet |
|--------------------------------------|------------|----------|-----------|------------|------------|-------------------|
| Egenskaper granat | | | | | | |
| Massa_total | m_tot | 3,4 | 12,8 | 11,7 | 38 | kg |
| Massa_stål | m_s | 2,8 | 10,6 | 9,93 | 31,27 | kg |
| Massa_Trotyl | m_t | 0,6 | 2,2 | 1,77 | 6,73 | kg |
| Andel_stål | andel_s | 0,824 | 0,828 | 0,849 | 0,823 | - |
| Andel_trotyl | andel_t | 0,176 | 0,172 | 0,151 | 0,177 | - |
| Densitet | rho_granat | 6534 | 6561 | 6684 | 6530 | kg/m ³ |
| Värmekapacitet | c_granat | 628 | 624 | 604 | 629 | J/kgK |
| Värmeledning | k_granat | 38 | 38 | 39 | 38 | W/mK |
| Volym | V_granat | 0,000520 | 0,001951 | 0,001751 | 0,005819 | m ³ |
| Mantelarea | A_granat | 0,031285 | 0,075502 | 0,070243 | 0,156450 | m ² |
| Radie | r_granat | 0,05 | 0,08 | 0,07 | 0,11 | m |
| Egenskaper stål^a | | | | | | |
| Värmeledningstal | k_s | 45,8 | 45,8 | 45,8 | 45,8 | W/mK |
| Densitet | rho_s | 7580 | 7580 | 7580 | 7580 | kg/m ³ |
| Värmekapacitet | c_s | 460 | 460 | 460 | 460 | J/kgK |
| Egenskaper trotyl^a | | | | | | |
| Värmeledningstal | k_t | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | W/mK |
| Densitet | rho_t | 1654 | 1654 | 1654 | 1654 | kg/m ³ |
| Värmekapacitet ^b | c_t | 1412 | 1412 | 1412 | 1412 | J/kgK |

^a Se tabell 9 för källor.

^b Medelvärde av intervallet 1294–1530 J/kgK.

Total beräkningsserie för sprängvinggranat 80 vid lufthastighet $u=15$ m/s presenteras i Tabell C 2. För övriga tre redovisas endast sista tre raderna, se Tabell C 3. Alla temperatursteg finns presenterade Figur C 1.

Tabell C 2. Beräkningsserie för SVINGGR 80 med lumped heat capacity analysis.

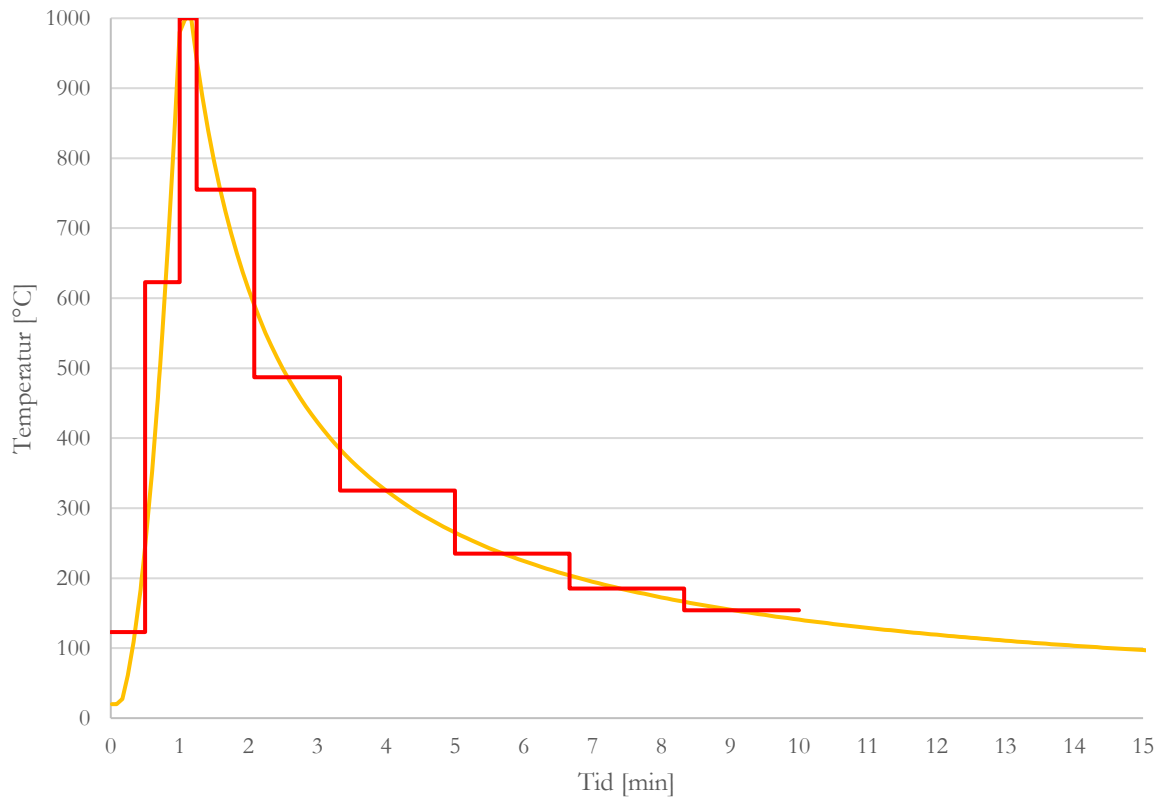
| | 0-30s | 30-60s | 60-75s | 75-125s | 125-200s | 200-300s | 300-400s | 400-500s | 500-600s | Enhet |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|--------------------|
| Granttemperatur | | | | | | | | | | |
| T _g | 123 | 623 | 1000 | 755 | 487 | 325 | 235 | 185 | 154 | °C |
| T ₀ | 20 | 24 | 50 | 125 | 184 | 216 | 230 | 231 | 224 | °C |
| t | 30 | 30 | 15 | 50 | 75 | 100 | 100 | 100 | 100 | s |
| T | 24 | 50 | 125 | 184 | 216 | 230 | 231 | 224 | 215 | °C |
| Reynolds tal | | | | | | | | | | |
| u | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | m/s |
| d | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | m |
| ν^a | 2,60E-05 | 9,93E-05 | 1,82E-04 | 1,18E-04 | 7,39E-05 | 5,13E-05 | 3,79E-05 | 3,17E-05 | 3,17E-05 | m ² /s |
| Re | 5,77E4 | 1,51E4 | 8,22E3 | 1,27E4 | 2,03E4 | 2,92E4 | 3,95E4 | 4,72E4 | 4,72E4 | - |
| Prandtls tal | | | | | | | | | | |
| α^a | 3,76E-05 | 1,43E-04 | 2,58E-04 | 1,68E-04 | 1,08E-04 | 7,51E-05 | 5,56E-05 | 4,64E-05 | 4,64E-05 | m ² /s |
| Pr | 6,90E-01 | 6,96E-01 | 7,05E-01 | 7,02E-01 | 6,86E-01 | 6,83E-01 | 6,81E-01 | 6,84E-01 | 6,84E-01 | - |
| Nussels tal | | | | | | | | | | |
| Nu _d | 265,908 | 118,890 | 82,628 | 107,307 | 141,936 | 176,620 | 211,900 | 235,828 | 235,828 | - |
| Konvektion | | | | | | | | | | |
| k | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | 0,03365 | W/mK |
| h _k | 90 | 40 | 28 | 36 | 48 | 60 | 71 | 80 | 80 | W/m ² K |
| Strålning | | | | | | | | | | |
| h _r | 9 | 60 | 156 | 98 | 54 | 37 | 29 | 25 | 23 | W/m ² K |
| Värmetransport | | | | | | | | | | |
| h _{tot} | 99 | 100 | 184 | 134 | 102 | 96 | 101 | 105 | 102 | W/m ² K |
| thau | 688 | 680 | 371 | 508 | 668 | 709 | 677 | 651 | 669 | - |
| Biots tal | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | - |

^a Samtliga värden i raden är hämtade från Incropera (2001).

Tabell C 3. Resultat för SVINGGR 120, SGR 105 och SGR 155

| | 0-30s | 30-60s | 60-75s | 75-125s | 125-200s | 200-300s | 300-400s | 400-500s | 500-600s | Enhet |
|--------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| SVINGGR 120 | | | | | | | | | | |
| h_{tot} | 44 | 94 | 177 | 127 | 91 | 83 | 86 | 54 | 51 | W/m ² K |
| τ_{thau} | 2383 | 1129 | 596 | 831 | 1160 | 1275 | 1236 | 1974 | 2056 | - |
| Biots tal | 0,03 | 0,06 | 0,12 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | - |
| SGR 105 | | | | | | | | | | |
| h_{tot} | 45 | 94 | 178 | 128 | 92 | 84 | 87 | 54 | 52 | W/m ² K |
| τ_{thau} | 2235 | 1069 | 565 | 787 | 1094 | 1198 | 1160 | 1848 | 1925 | - |
| Biots tal | 0,03 | 0,06 | 0,11 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | - |
| SGR 155 | | | | | | | | | | |
| h_{tot} | 38 | 89 | 173 | 123 | 84 | 74 | 48 | 46 | 44 | W/m ² K |
| τ_{thau} | 3966 | 1715 | 881 | 1244 | 1815 | 2055 | 3202 | 3292 | 3440 | - |
| Biots tal | 0,04 | 0,09 | 0,17 | 0,12 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | - |

Temperaturintervalluppdelning för LHC analysis

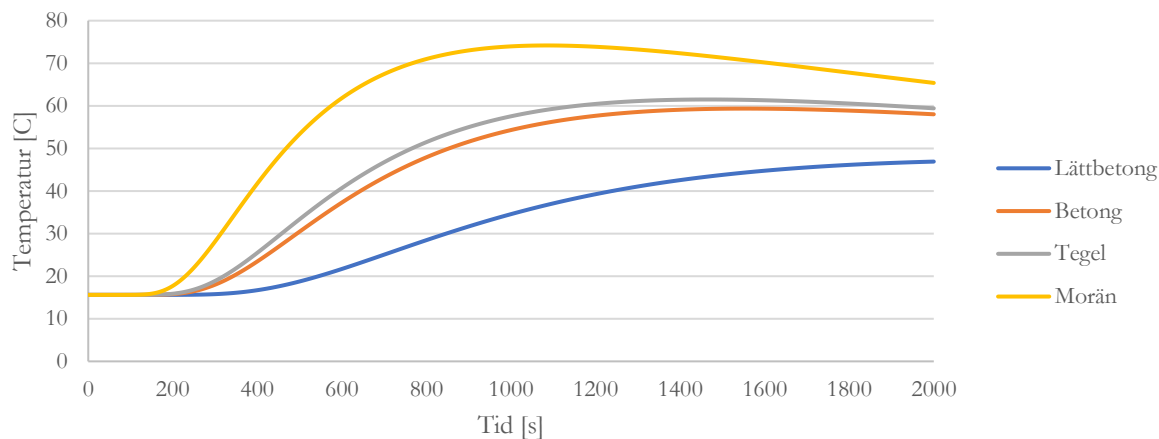


Figur C 1. Temperaturintervalluppdelning för lumped heat capacity analysis.

BILAGA D – JÄMFÖRELSE MED BYGGNADSMATERIAL

Som referens beräknades temperaturen-tid kurvan för olika byggnadsmaterial. Betong, tegel och lättbetong valdes ut då det är vanligt förekommande material och utgör därför bra som referens. Metoden som användes var precis samma som användes för morän. Branden var den dimensionerande brandkurvan som presenterades i avsnitt 5.1.

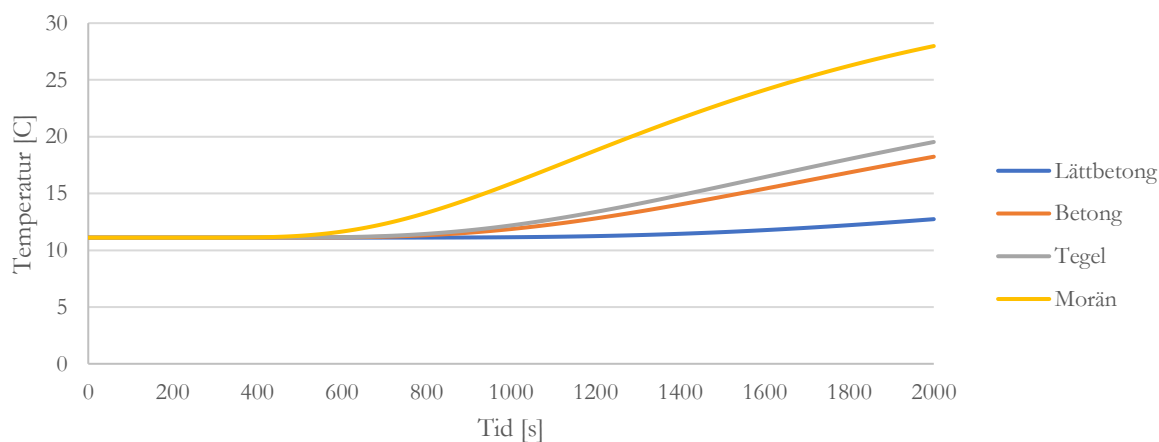
Temperatur för olika material vid 5 cm djup



Figur D 1. Temperaturkurvor för olika byggnadsmaterial och morän vid 5 centimeters djup.

Figur D 1 och Figur D 2 visar temperaturen för tre byggnadsmaterial samt morän. Indata för morän är medelvärden från tabell 8. Det går att utläsa att morän leder värme bättre än byggnadsmaterialen.

Temperatur för olika material vid 10 cm djup



Figur D 2. Temperaturkurvor för olika byggnadsmaterial och morän vid 10 centimeters djup.

Tabell D 1 presenterar värden för värmeledningstal, värmekapacitet och densitet för byggnadsmaterialen. Samtliga värden är hämtade för lättbetong, betong och tegel är från Karlsson och Quintiere (2000, s. 122).

Tabell D 1. Termiska egenskaper för byggnadsmaterial.

| | Lättbetong | Betong | Tegel | Morän | Enhet |
|-----------------------------|-------------------|---------------|--------------|--------------|---------------------|
| Värmeledningstal | 0,15 | 0,8 | 0,69 | 0,6–1,8 | W/mK |
| Värmekapacitet | 500 | 1900 | 1600 | - | J/kgK |
| Densitet | 1000 | 880 | 840 | - | kg/m ³ |
| Värmekapacitet, volymetrisk | 0,5 | 1,672 | 1,344 | 1,26–1,98 | MJ/m ³ K |

BILAGA E – JÄMFÖRELSE MED ANNAN VÄRMETRANSPORTMODELL

En jämförelse med analytisk lösning genomfördes för att undersöka hur resultatet skiljde sig mellan två beräkningsmetoder. Den analytiska kan inte hantera varierande temperatur och därför sattes T_g till konstant 600 °C. T_0 som är starttemperatur sattes till 20 °C. Termiska egenskaper för tegel användes, se Tabell E 1.

Tabell E 1. Termiska egenskaper för tegel.

| | Tegel | Enhet |
|-----------------------------------|--------------|-------------------|
| Värmeledningstal | 0,69 | W/mK |
| Värmekapacitet | 1600 | J/kgK |
| Densitet | 840 | kg/m ³ |
| Termisk diffusivitet ⁶ | 5,17E-7 | m ² /s |

Den analytiska lösningen hämtades från häftet ”Analytisk lösning av värmeledningsekvationen” (Brandteknik, 1990). Erfc är den komplementära felfunktionen⁷. Funktionen beräknar temperaturen T vid ett djup x och vid tiden t. Se ekvation E1.

$$T(x, t) = T_0 + (T_g - T_0) * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (\text{E1})$$

Resultatet presenteras i Tabell E 2. Den numeriska modellen beräknade konsekvent en högre temperatur, hur mycket presenteras i procent i kolumnen längst till höger.

Tabell E 2. Resultat från numerisk modell och analytisk lösning.

| Indata | Numerisk modell [°C] | Analytisk lösning [°C] | Procentuell skillnad [%] |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| t=100s, x=0,02375 | 35,53 | 31,04 | 14,47 |
| t=200, x=0,02375 | 87,45 | 76,45 | 14,39 |
| t=300, x=0,02375 | 135,77 | 121,98 | 11,31 |
| t=600, x=0,02375 | 239,47 | 216,30 | 10,71 |
| t=100, x=0,04875 | 20,00 | 20,00 | 0,00 |
| t=200, x= 0,04875 | 20,56 | 20,39 | 0,83 |
| t=300, x=0,04875 | 24,00 | 23,17 | 3,58 |
| t=600, x=0,04875 | 56,59 | 48,67 | 16,27 |

Resultatet visar att det finns en skillnad men det går inte att avgöra vilken av modellerna som lämpar sig bäst. Den analytiska lösningen kan inte hantera varierande temperatur och därför användes den numeriska.

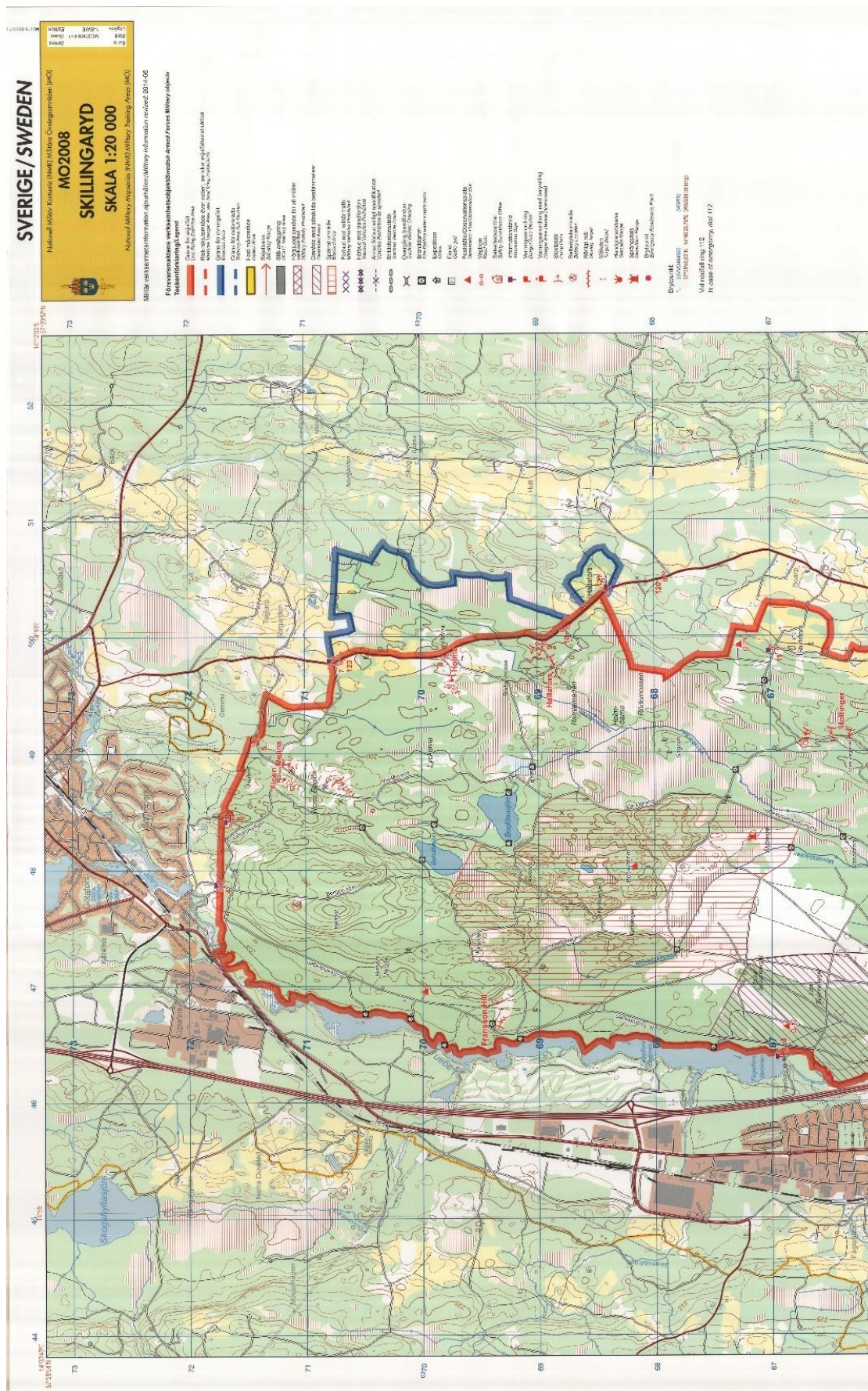
⁶ Termisk diffusivitet beräknas som $\alpha = k/\rho c$ (Karlsson & Quintiere, s.121, 2000)

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Error_function

BILAGA F – KARTOR



Figur F 1. Fullständig karta över skjutfältet. Kartan och allt dess innehåll ägs av Försvarsmakten.



Figur F 2. Karta som visar norra delarna av Skillingaryds skjutfält. Kartan och allt dess innehåll ägs av Försvarsmakten.