

FFI RAPPORT

Forsøk med hvitt fosfor røykgranater med nærhetsbrannrør og anslagsbrannrør – vurdering av miljømessige forhold og røykskjermingsegenskaper

Tove Engen Karsrud, Erik A. Wulvik, Arnljot E. Strømseng, Arnt Johnsen, Asbjørn Oddan, Jan Olav Langseth, Kjetil S. Longva

FFI/RAPPORT-2007/01545

Forsøk med hvitt fosfor røykgranater med nærhetsbrannrør og anslagsbrannrør – vurdering av miljømessige forhold og røykskjermingsegenskaper

Tove Engen Karsrud, Erik A. Wulvik,
Arnljot E. Strømseng, Arnt Johnsen, Asbjørn Oddan,
Jan Olav Langseth, Kjetil S. Longva

FFI/RAPPORT-2007/01545

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2007/01545 1a) PROJECT REFERENCE FFI-V/100702/917	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 56		
4) TITLE FORSØK MED HVITT FOSFOR RØYKGRANATER MED NÆRHETSBRANNRØR OG ANSLAGSBRANNRØR - Vurdering av miljømessige forhold og røykskjermingsegenskaper TESTING OF WHITE PHOSPHORUS SMOKE ROUNDS WITH PROXIMITY AND IMPACT FUSES - Evaluation of environmental aspects and smoke screen properties				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) KARSRUD Tove Engen, WULVIK Erik A, STRØMSENG Amljot E, JOHNSEN Arnt, ODDAN Asbjørn, LANGSETH Jan Olav, LONGVA Kjetil S				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN ENGLISH: a) <u>White phosphorus</u> b) <u>Smoke grenades</u> c) <u>Contamination</u> d) <u>Craters</u> e) <u>Screen properties</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Hvitt fosfor</u> b) <u>Røykgranater</u> c) <u>Forurensning</u> d) <u>Kratre</u> e) <u>Røykdannelse</u> </td> </tr> </table>			IN ENGLISH: a) <u>White phosphorus</u> b) <u>Smoke grenades</u> c) <u>Contamination</u> d) <u>Craters</u> e) <u>Screen properties</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Hvitt fosfor</u> b) <u>Røykgranater</u> c) <u>Forurensning</u> d) <u>Kratre</u> e) <u>Røykdannelse</u>
IN ENGLISH: a) <u>White phosphorus</u> b) <u>Smoke grenades</u> c) <u>Contamination</u> d) <u>Craters</u> e) <u>Screen properties</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>Hvitt fosfor</u> b) <u>Røykgranater</u> c) <u>Forurensning</u> d) <u>Kratre</u> e) <u>Røykdannelse</u>			
THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT <p>The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) has conducted firings of white phosphorus smoke grenades with proximity and impact fuses in order to evaluate the differences in smoke screen properties, creation of impact craters and contamination of white phosphorus.</p> <p>The creation of impact craters is strongly reduced when the proximity fuses are used. The artillery shells with proximity fuse detonate some metres above the ground. This causes a better spreading of the white phosphorus particles which results in an increased smoke formation. Better burning of the white phosphorus yields less particles on the ground and the contamination is reduced.</p>				
9) DATE 2007-02-15	AUTHORIZED BY This page only Jan Ivar Botnan	POSITION Director		

ISBN 978-82-464-1256-6

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
1.1	Formål	7
1.2	Bakgrunn	7
2	METODE	8
2.1	Vurdering av miljømessige forhold	8
2.1.1	Befaring av aktuelle nedslagområder	8
2.1.2	Artilleri	9
2.1.3	Bombekaster	11
2.1.4	Prøvetaking og observasjon av nedslagsområdene	14
2.1.5	Kjemisk analyse	15
2.2	Røykutviklingen	15
2.2.1	Røykskyareal – målemetode	16
3	RESULTATER OG DISKUSJON	18
3.1	Vurdering av miljømessige forhold	18
3.1.1	Artilleri	18
3.1.2	Bombekaster	23
3.2	Røykutspredningen	27
3.2.1	Artilleri - Røykskyarealer	27
3.2.2	Spreng høyder - nærhetsbrannrør	32
3.2.3	Bombekaster – røykskyarealer	33
3.2.4	Røyklegging, 155 mm FA – sammenlikning av brannrørtype	38
3.2.5	Røyklegging, 81 mm BK – sammenlikning av brannrørtype	39
3.2.6	Røyklegging, 81 mm BK og 155 mm FA – sammenlikning	41
3.3	Oppfølging – videre arbeid	43
4	KONKLUSJON	43
APPENDIKS		
A	KARTUTSNITT AV PRØVEOMRÅDET, HJERKINN	45
B	MATLAB – SCRIPT FOR BEREGNING AV RØYKSKYAREAL	46
C	MATLAB-SCRIPT FOR BEREGNING AV ÉN AVSTAND I ET BILDE	47
D	MATLAB-SCRIPT FOR BEREGNING AV FLERE AVSTANDER I SAMME BILDE	48
E	BILDER RØYKUTVIKLING 155 MM FA	49
E.1	Anslagsbrannrør	49
E.2	Nærhetsbrannrør	50
F	BILDER RØYKUTVIKLING 81 MM BK	53

F.1	Anslagsbrannrør	53
F.2	Nærhetsbrannrør	54
	Litteratur	56

Forsøk med hvitt fosfor røykgranater med nærhetsbrannrør og anslagsbrannrør – vurdering av miljømessige forhold og røykskjermingsegenskaper

1 INNLEDNING

1.1 Formål

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) har over lengre tid arbeidet med miljøkonsekvenser knyttet til Forsvarets bruk av røykammunisjon med hvitt fosfor. Ett av målene med dette arbeidet er å finne fram til egnede nedslagsområder, slik at miljøbelastningene ved bruk av denne typen ammunisjon blir lavest mulig. Et mulig tiltak for å redusere miljøkonsekvenser, kan være å bruke nærhetsbrannrør istedenfor anslagsbrannrør, som blir benyttet i dag. Denne undersøkelsen har hatt som mål å sammenlikne belastningen på miljøet ved bruk av disse to brannrørene og undersøke i hvilken grad det er forskjeller i røykutviklingen. Ved den miljømessige vurderingen er det fokusert på forskjeller i kraterdannelse og rester av hvitt fosfor i nærområdet til treffpunktet av ammunisjonen, mens det er foretatt en visuell observasjon av røykdannelsen med bakgrunn i fotografier.

1.2 Bakgrunn

På fosforgranater benyttes det i dag anslagsbrannrør. Granaten treffer bakken og først da settes granaten av. Dette resulterer i kratre på bakken med diametere på 1 – 1,5 meter og med dybder på 0,5 – 0,8 meter fra artillerigranater og litt mindre kratre fra bombekastergranater. Fosforbiter i ulike størrelser kastes ut ved detonasjonen. Fosforet reagerer med oksygenet i lufta og danner fosforpentoksid. Røyken dannes ved at fosforpentoksid reagerer med vannet i lufta. Mengden av røyk som dannes er avhengig av luftfuktigheten. Uforbrente fosforbiter vil falle ned på bakken. På tørr grunn vil hvitt fosfor fortsette å brenne og forsvinne. I våte nedslagspunkt forbrennes ikke fosforet, og det kan bli liggende igjen mye rester. Der det er mye vegetasjon og jordsmonn, kan fosforbiter bli presset inn i og begravd i bakken rett etter detonasjonen. Uten tilgang på oksygen vil disse mengdene forbli uforbrent, og det vil bli rester nede i bakken. Mengden hvitt fosfor som kan bli liggende igjen på bakken er derfor svært avhengig av bakkens beskaffenhet.

Ved bruk av nærhetsbrannrør vil granatene gå av noen meter over bakken. Dette vil sannsynligvis begrense kraterdannelsen og også hindre at hvitt fosfor blir presset inn i jordsmonnet. Det er grunn til å tro at utkastet av hvitt fosfor blir bedre i forhold til røykdannelse når spredningen skjer over bakken, men spredningen vil nok avhenge av hvor høyt over bakken granaten går av. Økt spredning kan føre til økt omsetning av hvitt fosfor og dermed reduksjon av mengden partikler som faller på bakken og eventuelle rester. Det er derfor ønskelig å teste ut nærhetsbrannrør på granatene for å se hvilke effekter dette har på dannelse av kratre og mengden av hvitt fosforrester på bakken.

Forsvaret har flere typer røykammunisjon som benyttes til skjermingsrøyk for å skjule egne stillinger og forflytninger, og for å blinde fienden. Hvitt fosfor er en av røyksatsene som Forsvaret benytter. Som nevnt blir disse røykgranatene satt av med anslagsbrannrør. Bruk av annet brannrør på granatene må ikke føre til en reduksjon av røykegenskapene til granatene. Det er derfor viktig å måle forskjeller i røykutvikling og – utbredelse ved bruk av de to brannrørene.

Ved bruk av bombekastergranater med anslagsbrannrør skjer det ofte at halepartiet til granaten blir stående igjen i sentrum av kratret etter detonasjon. Halepartiet kan inneholde rester av hvitt fosfor, og dette fosforet kan da bli liggende igjen i bakken og blir ikke forbrent. På bakgrunn av dette vil en undersøke hva som skjer med halepartiet når nærhetsbrannrør benyttes.

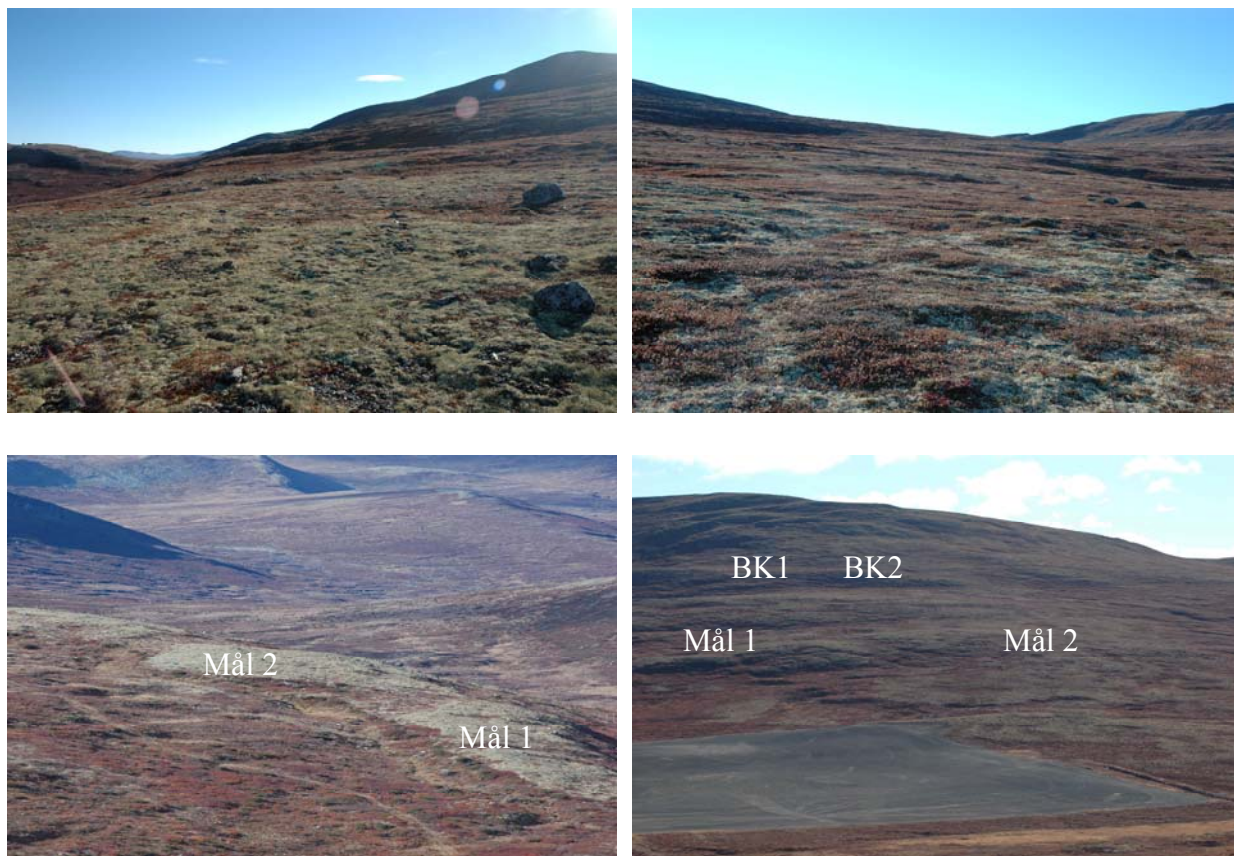
Denne rapporten beskriver forsøk som er gjort på bar mark med 155 mm artillerigranater og 81 mm bombekastergranater for å teste ut de aktuelle problemstillingene beskrevet over. Forsøkene fant sted på Hjerkin 18. - 21. oktober 2005.

2 METODE

2.1 Vurdering av miljømessige forhold

2.1.1 Befaring av aktuelle nedslagsområder

Forsvarssjefen ga i 2003 ut retningslinjer for bruk av hvitt fosforgranater. Det forbyr bruk på snødekket mark, i myr og på våtmarksområder, i vann og i forbindelse med vannveier. Det henstilles om å etablere egne målområder på tørr morenegrunn eller fjell/berggrunn. I henhold til disse kravene ble det av skyteadministrasjonen på Hjerkin foreslått noen aktuelle områder for skyting under brannrørsforsøkene. Et krav FFI stilte var at nedslagsområdene burde være synlige fra minst to observasjonsposter, fordi det var behov for å filme og fotografere nedslagene og utviklingen av røyken. FFI foretok derfor en befaring i Hjerkin skyte - og øvingsfelt 2. oktober 2005 for å vurdere de foreslåtte nedslagsområdene. Det området som var best egnet ut ifra en helhetsvurdering var området i skråningen nedenfor Breidskaret, som går nedover mot HKF-sletta på oversiden av det utvendige gjerdet. Her er det fjellrabber med lite vegetasjon, og området ble vurdert til å være relativt tørt. Hit kan man se godt fra observasjonsposter både ved OP-hytta ved Rollstadsætri og fra Edvinbu. Bilder fra valgt nedslagsområde er vist i Figur 2.1



Figur 2.1 Bilder fra befaring i valgt nedslagsområde for hvitt fosforgranater

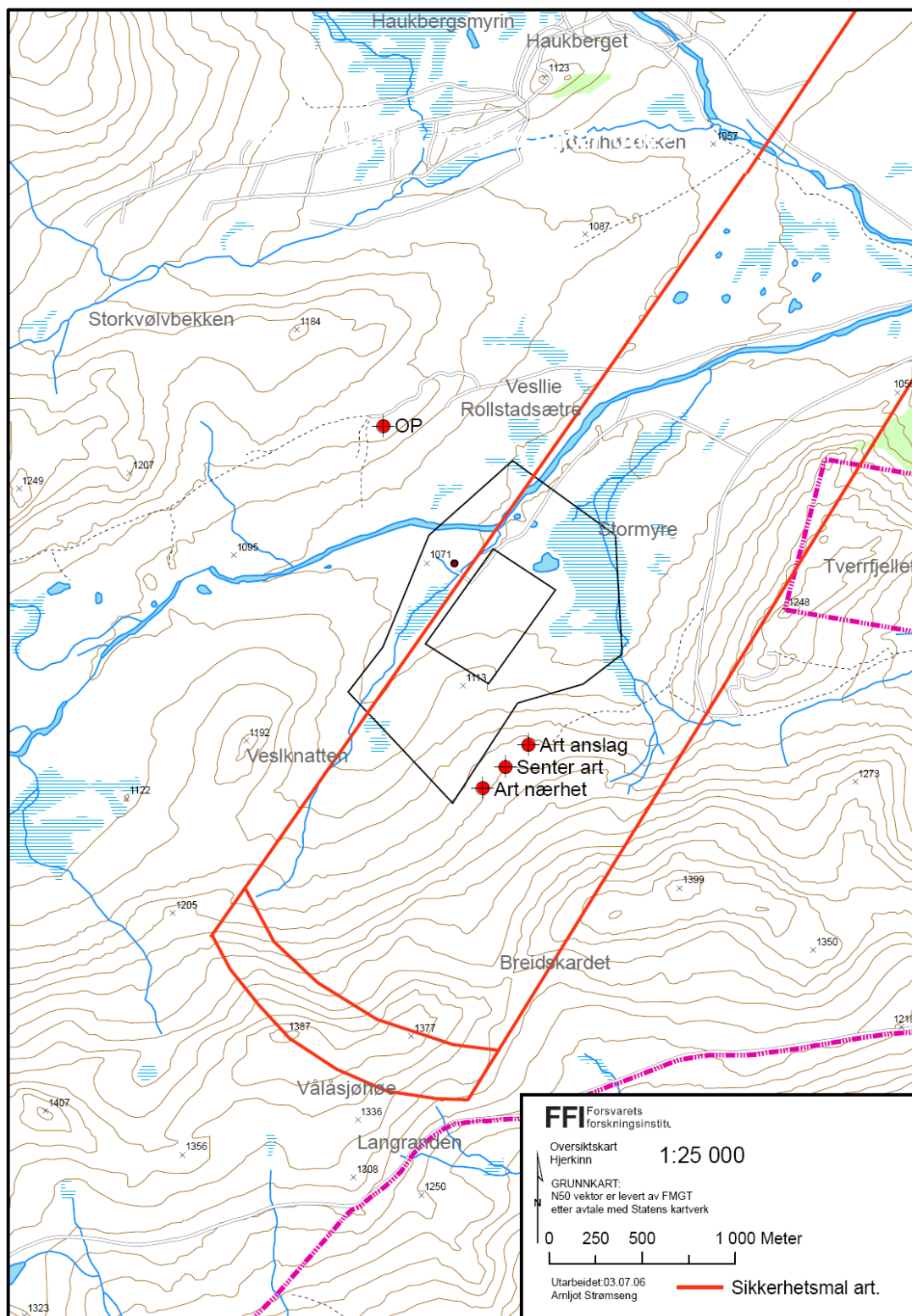
2.1.2 Artilleri

Nedslagsområdet for artillerigranatene krever et stort område med lik beskaffenhet. Granater med samme type brannrør skal skytes mot hvert sitt nedslagspunkt som skal ligge 300 – 400 meter fra hverandre. Avstanden mellom målene må være stor nok til at eventuelle feiltreff på målet i det ene området ikke forstyrrer for observasjoner og prøvetaking i det andre målet. Grunnen på de to stedene må være tilnærmet lik for å kunne sammenlikne miljømessige effekter i de to tilfellene. De to valgte nedslagspunktene ble kalt Mål 1 og Mål 2, se Figur 2.1. Mål 1 er nedslagsområdet for granater med anslagsbrannrør, og Mål 2 er for granater med nærhetsbrannrør.

Standplass ble valgt til å være langs Storråndveien ved grensa til Nasjonalparken. Avstanden fra standplass til målpunktene er 7 – 8 km. Målpunktene og sikkerhetsmalen er tegnet inn på kart i Figur 2.2.

Ammunisjonen som ble benyttet for å skyte artillerigranater er listet opp i Tabell 2.1. Røykgranatene er av typen 155 mm røyk WP M110. Granaten inneholder 7100 gram hvitt fosfor. Bristeladningen består av ca 380 gram tetrytol (70 % tetryl og 30 % TNT) som initieres av en overdrager av tetryl. Det ble planlagt å skyte 4 granater med anslagsbrannrør og 4 granater med nærhetsbrannrør. Passende brannrør ble bestilt, samt drivladninger og tennpatroner. Forut for

fosforgranatene ble det skutt en sprenggranat for å skyte seg inn på målområdet. Sprenggranaten var av typen 155 mm Spreng NM28 som inneholder en sprengladning på 6700 gram TNT. Granaten settes av med en overdrager av tetryl og en tilleggsladning av TNT.



Figur 2.2 Kart over nedslagfeltet for artillerigranater med inntegnet sikkerhetsmaler (røde linjer rundt nedslagene)

Alle granatene ble skutt på formiddagen torsdag 20. oktober 2005. Forsvarets logistikkorganisasjon (FLO), som allerede var på Hjerkin i anledning andre oppdrag, stod for skytingen med en M109. De fire granatene med anslagsbrannrør ble først skutt mot Mål 1, og deretter ble fire granater med nærhetsbrannrør skutt mot Mål 2. Tiden mellom hver granat som ble avfyrt ble regulert slik at man fikk tid til å fotografere og filme røykutviklingen. Røykskya fra en skutt granat måtte være drevet langt nok vekk for ikke å interferere med neste røyksky. Ved hver skyting ble det tatt bilder og film av røykutviklingen fra de to observasjonspostene ved Rollstadsætri og Edvinbu. Det ble tatt ett bilde ca hvert sekund i løpet av røykutviklingen.

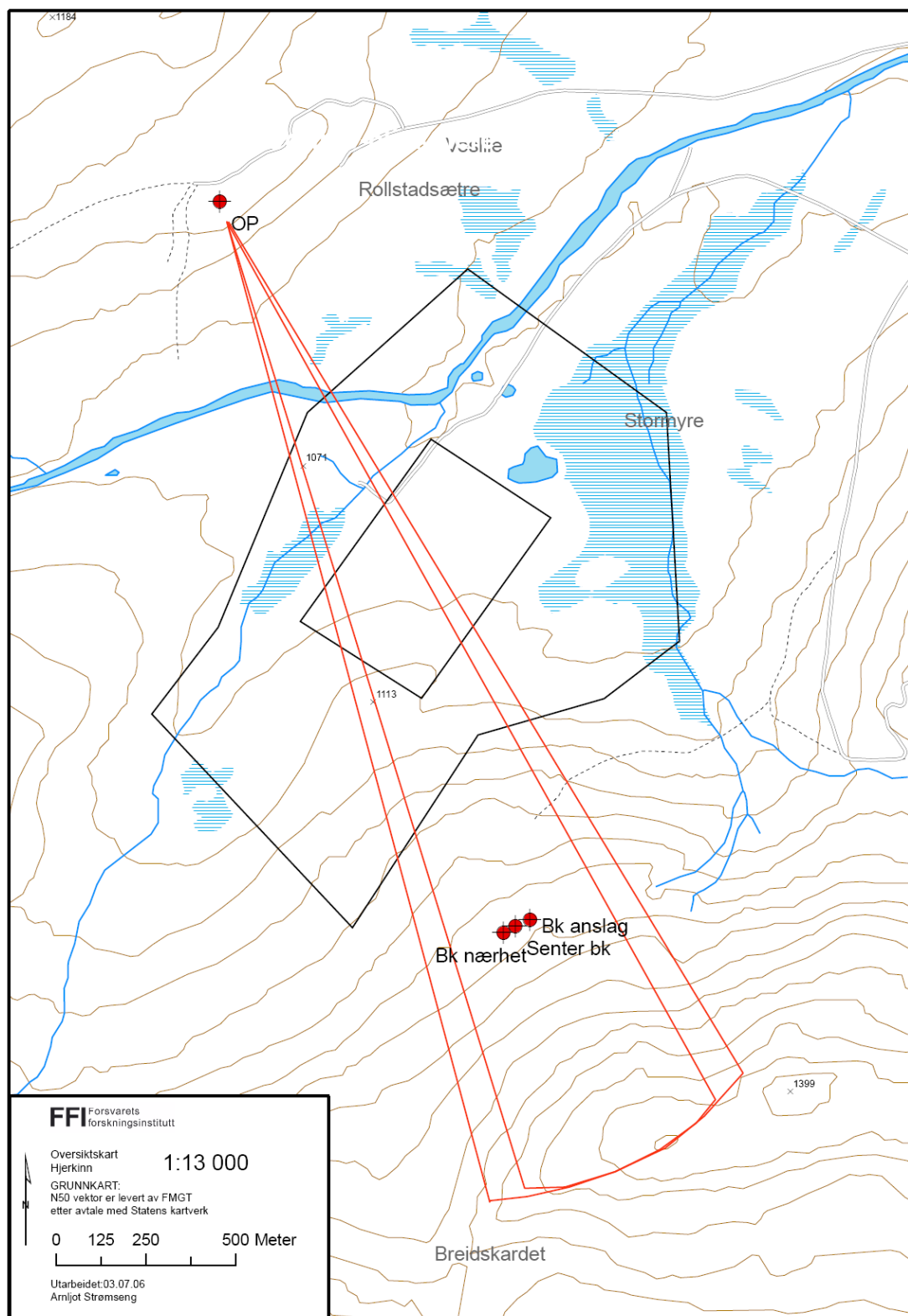
Antall	Type ammunisjon/materiell
1	Granat, 155 mm, Spreng, TNT, NM28
8	Granat, 155 mm, Røyk, WP, M110
5	Brannrør, spissdetonerende, m/overdrager M125, M557
4	Brannrør, nærhet, F/155 mm og 105 mm, FH, PPD440F1, spreng høyde 10 m (1)
9	Tennpatron, Perkusjon, For 155 mm FH, DM191
9	Ladning, driv, 155 mm, NM23

Tabell 2.1 Ammunisjon som ble benyttet

Et fly var leid inn for at en fotograf fra FFI skulle være med ombord og fotografere. Flyet skulle sirkle over området og ta bilder av hendelsen og røykutbredelsen ovenfra. På grunn av sikkerheten lot det seg ikke gjøre å befinne seg rett over målområdene. Flyet måtte hele tiden befinne seg utenfor sikkerhetsmalene, og fotografering måtte foretas i vinkel ned mot hendelsesstedet. Det ble da litt for stor avstand til hendelsene, og bildene derfra ble ikke som ønsket og er ikke benyttet for å evaluere resultatene.

2.1.3 Bombekaster

Nedslagspunktene for BK-granatene med de to brannrørstypene ble kalt BK1 og BK2, hvor det første er målområdet for granater med anslagsbrannrør og det andre for nærhetsbrannrør. Avstanden mellom disse to målpunktene er i underkant av 100 meter. Dette er tilstrekkelig siden granatene er mindre, lager mindre kratre og inneholder mindre fosfor enn artillerigranatene. Bombekastermålene lå 200 – 300 meter lenger oppe i skråningen enn artillerimålene, og de var synlige fra de samme observasjonspostene. Standplass var ved OP-hytta ved Rollstadsætri, slik at det ble skutt tvers over HFK-sletta, ca 2 km. Målpunktene og standplass er tegnet inn på kartet i Figur 2.3 sammen med sikkerhetsmalene.



Figur 2.3 Kart over nedslagsområdet for BK-granater med inntegnet sikkerhetsmaler (røde linjer)

Ammunisjonen som ble benyttet under forsøket er gitt i Tabell 2.2. Tilsvarende som for artillerigranatene ble det skutt fire fosforgranater med anslagsbrannrør og fire med nærhetsbrannrør. Også her ble det benyttet sprenggranat for innskyting. Fosforgranaten er av typen BK Røyk WP M57. Den inneholder 1855 gram hvitt fosfor. Bristeladningen og overdrageren består begge av tetryl, ca 40 gram til sammen. Bombekastergranatene leveres komplette med brannrør og drivladninger montert på granatene. Fosforgranatene er utstyrt med anslagsbrannrør. Det var derfor nødvendig å skru av anslagsbrannrøret på granaten og montere på nærhetsbrannrør i stedet. Nærhetsbrannrørene var bestilt separat, og ble montert på granatene rett forut for skyting. Figur 2.4 viser bilde av BK-granatene. I Norge finnes det også en annen type BK-granat som inneholder hvitt fosfor. Det er 81 mm BK Røyk WP G40/L16 MK 1, som inneholder 710 gram hvitt fosfor. Denne granaten er benyttet tidligere av FFI under forsøk med hvitt fosforgranater, men kunne ikke benyttes nå på grunn av at nærhetsbrannrøret ikke passet.

Personell fra Telemarksbataljonen var leid inn for å foreta skytingen med bombekaster. BK-granatene ble avfyrt på ettermiddagen torsdag 20. oktober 2005. BK-granatene ble filmet og fotografert fra OPene; ved standplass ved Rollstadsætri og fra masta ved Edvinbu.

Antall	Type ammunisjon/materiell
1	Granat, 81 mm, Spreng M/BR SD DM111A2, NM123
4	Granat, 81 mm, Røyk, WP M/BR SD M525 M57A1
4	Granat, 81 mm, Røyk, WP M/BR SD M525 M57A1 med brannrør fjernet
4	Brannrør, nærhet, For 81 mm BK, PPD323, spreng høyde 3 m (1)

Tabell 2.2 Ammunisjon som ble benyttet



Figur 2.4 Bilde av bombekastergranatene

2.1.4 Prøvetaking og observasjon av nedslagsområdene

Etter at alle granatene var skutt, dro man inn i nedslagsområdet for å se på de enkelte nedslagene og eventuelle kratre, og ta jordprøver. Områdene ble undersøkt visuelt for å vurdere kraterstørrelser og detektere eventuelle fosforrester og spredningen av disse.

Nede i kratrene fra artillerigranatene med anslagsbrannrør og rundt ble det tatt jordprøver. En blandprøve som består av 30 delprøver ble tatt fra forskjellige steder nede i kratret for å bestemme gjennomsnittskonsentrasjon av hvitt fosfor i kratret. Tilsvarende ble det for området rundt kratret, i en radius av ca 1 meter utenfor kraterets sentrum, laget en blandprøve bestående av 30 delprøver. Tilsatsene ble tatt opp med en prøvekopp som vist i Figur 2.5.

I nedslagsfeltet for artillerigranater med nærhetsbrannrør ble det tatt to blandprøver for hvert antatt nedslag. En prøve er samlet i sårene/gropene etter fragmentnedslag, og den andre er samlet fra området rundt, blant annet fra svimerkene.

Det ble tatt prøver fra nedslagspunktene til granatene med anslagsbrannrør ca tre timer etter detonasjon, mens det ikke ble tatt prøve fra området der granatene med nærhetsbrannrør hadde detonert før etter ca seks timer. Prøvematerialet ble anbrakt i glassflasker som ble etterfylt med vann. Dette for å bringe eventuelle fosforrester i prøven under vann og hindre røykutvikling og antennelse av fosforet. Prøveflaskene ble pakket og fraktet til FFI på Kjeller med bil. Der ble prøvene analysert med hensyn på hvitt fosforinnhold.

I nedslagsområdet for bombekastergranatene var det ikke planlagt å ta jordprøver. Her skulle området kun undersøkes visuelt for å se på eventuelle forskjeller på nedslagene etter bruk av de to ulike brannrørene samt undersøke skjebnen til halepartiet til granatene med nærhetsbrannrør.



Figur 2.5 Prøvetaking av jord med prøvekopp ved krater fra 155 mm fosforgranat med anslagsbrannrør

2.1.5 Kjemisk analyse

Analysemetoden for hvitt fosfor i jord- og sedimentprøver er basert på en metode som ble utviklet av FFI i forbindelse med undersøkelser av hvitt fosfor i Hjerkinnskytefelt i 1988 (2). Denne metoden baserer seg på en ekstraksjon av hvitt fosfor med karbondisulfid og en gasskromatografisk bestemmelse ved bruk av nitrogen/fosfor-detektor. En noe tilsvarende metode er senere blitt utviklet i USA, der det er utgitt en EPA metode 7580 for bestemmelse av hvitt fosfor i prøver ved bruk av løsemiddelekstraksjon og gasskromatografi (3). De analysemetodene som FFI benytter for bestemmelse av hvitt fosfor i prøver er nærmere beskrevet i FFI/RAPPORT-2003/01224 (4) og FFI/RAPPORT-2004/00177 (5).

2.2 Røykutviklingen

En måte å måle effektiviteten av røykutviklingen kan være det totale arealet av røykskyen projisert mot et plan vinkelrett på observasjonsretningen som funksjon av tiden. Denne metoden danner prinsippet for hvordan røykutviklingen er målt i dette forsøket. Dette arealet behøver imidlertid ikke å være det effektive røykskjermingsarealet som dekker en fiendtlig styrke. Dette skyldes at når hvitt fosfor brenner, vil den røyken som utvikles være varm og således ha et varmeløft som er ugunstig, spesielt i stille vær.

Meteorologiske faktorer har betydning med hensyn til effektiviteten av en røyklegging. Det kan nevnes vind, temperatur og temperaturgradienter, relativ fuktighet, nedbør og graden av skydekke. Dessuten har topografien i området og vegetasjonen også en betydning. Vindretning og vindstyrke har dog den største effekten og vil avgjøre om det er tilrådelig å bruke røyk i en gitt taktisk situasjon. Disse faktorene vil også innvirke på ammunisjonsforbruket i forhold til en planlagt skjermingstid.

Det er viktig å merke seg at den vindretningen som ”styres” røyken, er den retning som gjelder i området fra 6 m opp til 200 m over bakken. Røyk basert på en massiv fosforsats i granaten, avgir som nevnt, betydelig varme under etablering og danner en røyksøyle i vindstille vær. Ved anvendelse av denne typen røyk anbefaler US Army en vindhastighet som bør være større enn 4 – 5 m/s (6).

Temperaturen i lufta har ikke en direkte innvirkning på omsetningen av hvitt fosfor. Imidlertid vil mengden vanndamp i lufta ha innvirkning på hvor mye røyk som produseres etter at fosforet er forbrent. Den maksimale vanndampkonsentrasjonen øker med stigende temperatur. Ved en gitt temperatur vil som regel ikke lufta være mettet med vanndamp, dvs den relative fuktighet vil ikke være 100 %. Det er dog ønskelig at den relative fuktigheten skal være så høy som mulig. Dersom røykproduksjonen er lik 1 ved helt tørr luft, vil den være ca 8 ganger større ved en relativ fuktighet på 90 % ved samme temperatur (6).

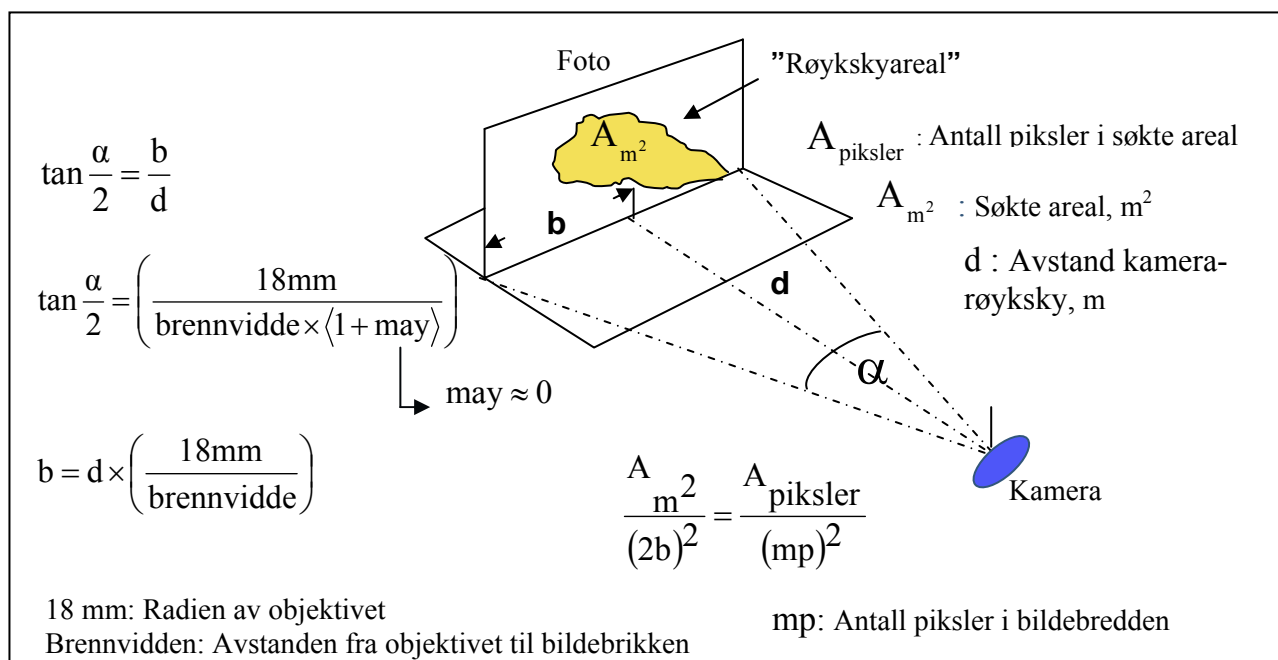
Temperaturgradienten i lufta vil imidlertid i høy grad innvirke på utformingen av røykskyen. Ustabile forhold der temperaturen avtar med høyden (vanlig 0,6 – 0,7 °C pr 100 m) med lite vind og klar himmel, gir ugunstige forhold. Temperaturinversjoner hvor den kaldeste lufta ligger

nær bakken, noe som forekommer mest om vinteren med skydekke, vil favorisere en røyk-etablering som ønskes lagt nær bakken. Nedbør i form av lett regn bevirker at røyken holder seg nærmere bakken og spres ut over et større område.

For å gjennomføre sammenliknende røykforsøk er det ønskelig at de forhold som er nevnt ovenfor blir tatt i betraktning. For beregning av røykarealene med den metoden som er beskrevet i kapittel 2.2.1, er det ønskelig at vindretningen er relativt stabil og mest mulig på tvers av observasjonsretningen. For å ha oversikt over de klimatiske forholdene under forsøket, ble det satt ut en MAWS værstasjon sørvest for Mål 2. Denne stasjonen måler trykk, temperatur, relativ luftfuktighet, vindstyrke og vindretning. Kartskisse av området med nedslagsfelt og stillinger for observasjoner, er vist i Appendiks A.

2.2.1 Røykskyareal – målemetode

Basert på bilder av røykutspreddingen, ble det utviklet en egen metode for beregning av røykarealene. Denne metoden anvender et Matlab-script som leser inn bilder ved å bruke et verktøy (roipoly) fra Image Processing Toolbox, se Appendiks B. Med dette programmet avmerker man konturene av røykskyen på en dataskjerm. Arealet av røykskyen i bildeplanet beregnes deretter av scriptet med avstand fra kamera til nedslagsfeltet samt brennvidden på objektivet som inngangsdata. Brennvidden som kan variere under en bildeserie, hentes automatisk fra EXIF-dataene i selve bildefilen. I Figur 2.6 er det gitt noen likninger med en forklarende skisse som viser sammenhengen mellom det søkte areal og piksler i bildefilen. I Figur 2.7 ser man metoden anvendt på en av røykskyene.



Figur 2.6 Sammenhengen mellom det søkte røykskyareal og piksler i bildefilen

Ved den anvendte metoden er det ikke behov for referansepunkter i terrenget. Dessuten kan brennvidden justeres under en bildeserie for å få røykskyen til å dekke en større del av bildeflaten. Dette er ønskelig når skyen er relativt liten i startfasen. Avstanden fra observasjonsposten til røykskyen må være kjent og tilnærmet konstant under røykutspredningen. Feilen i avstand vil være liten ved en observasjonsavstand på 2 km eller mer, samtidig som vinden passerer på tvers. Avstanden fra nedslagsområdet til observasjonsposten ved Rollstadsætri var ca 2 km. Transportretning av røykskyene ble vurdert til å være noe mellom på tvers og litt forfra. Observasjonsposten ved Edvindbu hadde røyken delvis imot. Den skisserte metoden for beregning av røykareal kunne derfor ikke benyttes derfra da avstanden til fronten av røykskyen ble gradvis mindre.



```
>> Wulvik21
Gi filnavn: 'DSC_0048.JPG'
Avstand til nedslag (m): 1900
Tegn polygon i bildet. Dobbelklikk for å avslutte!
Warning: Image is too big to fit on screen; displaying at 33%
> In imuitools\private\initSize at 86
  In imshow at 201
  In roipoly>parse\_inputs at 153
  In roipoly at 64
  In Wulvik21 at 28
Røykareal i bildet DSC_0048.JPG er 3920.4035 kvm
```

Figur 2.7 Eksempel på beregning av arealet av en røyksky med tilhørende utskrift. Arealet er beregnet etter at den prikkede linjen er lagt inn til røykskyen. Varmeløftet av røykskyen viser at det er liten vind i området

3 RESULTATER OG DISKUSJON

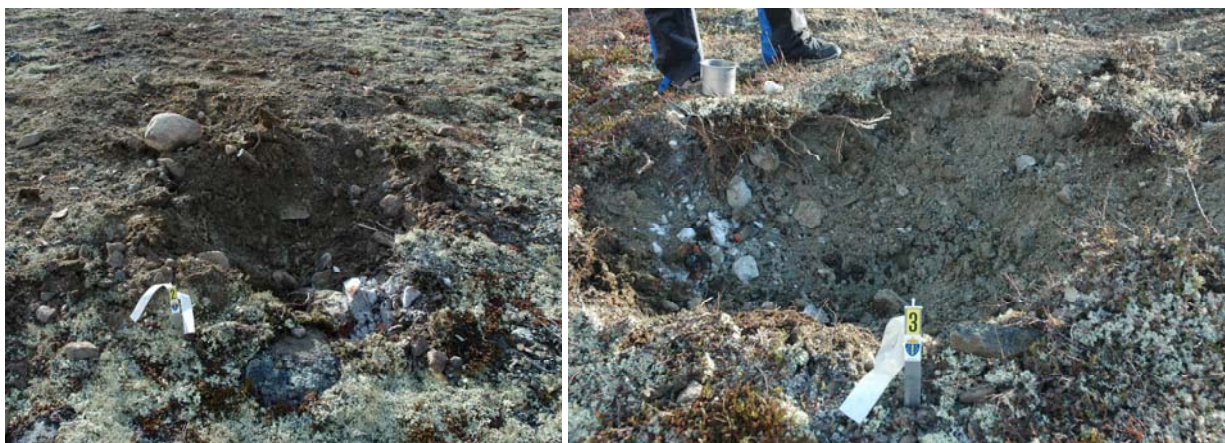
3.1 Vurdering av miljømessige forhold

3.1.1 Artilleri

Alle fire granatene med anslagsbrannrør gikk av som forventet. Anslagene kom ved treff i bakken. To av granatene landet innenfor en sirkel av ca 20 meter fra Mål 1. Kratrene som ble dannet var ca 0,5 – 0,8 meter dype med en diameter på 1 – 1,5 meter. Bilder av kratrene fra skudd nr 1 – 4 er vist i Figur 3.1 og Figur 3.2. Bildene viser at detonasjon av granatene har ført til at det blir dannet kratre i bakken, og at jord og masse er kastet opp og utover. Enkelte steder dannes svarte brennmerker etter hvitt fosfor. Brennende hvitt fosfor har falt ned og svidd av vegetasjonen. Noen steder (krater 1 og 3) og på noen steiner (Figur 3.3) er det rødbrune flekker og svarte klumper/områder. Dette er sannsynligvis fosforrester. Det røde er trolig hvitt fosfor som er omdannet til rødt fosfor under forbrenningen. Rødt fosfor kan dannes hvis hvitt fosfor brenner med dårlig tilgang på oksygen og når temperaturen blir høy. Det svarte kan være svart fosfor. Disse fenomenene er også tidligere observert under gjennomføring av forsøk med hvitt fosfor (4). Nedslagspunktet for granatene med anslagsbrannrør er typisk og som forventet ved bruk av hvitt fosforgranater.



Figur 3.1 Bilder av kratrene 1 og 4 fra artillerigranater med anslagsbrannrør



Figur 3.2 Bilder av kratrene 2 og 3 fra artillerigranater med anslagsbrannrør

De målte konsentrasjonene av hvitt fosfor i jordprøvene er vist i Tabell 3.1. Mengden av hvitt fosfor som er funnet i disse kratrene er en del lavere enn det som tidligere er funnet i kratre fra artillerigranater skutt inn i våte områder (7,8). Det betyr at bakken har vært ideell som nedslagsområde for hvitt fosforgranater i dette forsøket; tørr, drenerende og lite vegetasjon. Under observasjon av kratrene og under prøvetakingen ble det rotet litt i jordmassene nede i kratret, og man opplevde da at det kom opp røyk ettersom nye mengder med hvitt fosfor ble gravd fram fra massene og eksponert mot luft.



Figur 3.3 Hvitt fosfor som sannsynligvis er omdannet til rødt og svart fosfor

Mengden av hvitt fosfor utenfor kratrene er betydelig lavere enn det som ble målt nede i kratrene. Dette viser at forurensningen av hvitt fosfor hovedsakelig er begrenset til selve kratret, og at restene av hvitt fosfor som havner på tørr mark utenfor kratret raskt forbrenner og

forsvinner. Av miljømessige hensyn er det derfor viktig at de retningslinjer som er gitt for bruk av hvitt fosfor følges.

For å få en oversikt over om det blir liggende rester av hvitt fosfor i lengre tid i områdene, ble prøvetakingen gjentatt i juli 2006, det vil si 8 måneder etter skytingen. Prøver ble tatt i alle kratrene samt utenfor to av dem. Resultatene er gitt i Tabell 3.1 sammen med de første målingene. Det observeres en kraftig reduksjon av hvitt fosformengder i kratrene og utenfor disse. Dette viser ytterligere at nedslagsområdet var vel egnet for skyting med hvitt fosfor, og at stort sett lite rester av hvitt fosfor blir liggende i området. I krater 4 observeres derimot noe annet. Her er det fortsatt mye hvitt fosfor igjen. Knappt 30 % av mengden er brutt ned. Dette kan skyldes at forholdene nede i dette kratret kan ha vært mindre ideelle enn de andre med hensyn på nedbrytning av hvitt fosfor. Denne granaten landet lengst fra målpunktet det ble skutt mot, slik at krater 4 befinner seg på en rygg ned mot området med mer vegetasjon. Det kan være at det har vært mer vann og dårligere drenering i dette kratret som har ført til dårligere forhold for nedbrytning av hvitt fosfor. Dette kan skyldes at det er noe mer stein i dette kratret sammenliknet med de andre, og at dette kratret ligger nederst i nedbørsfeltet. FFI vil følge opp området med årlige målinger på lik linje med flere andre hvitt fosforkratere i Hjerkinnskyte- og øvingsfelt.

Prøvepunkt	Konsentrasjon av hvitt fosfor, mg/kg tørr prøve	
	Oktober 2005	Juli 2006
Artillerikrater 1, nede i kratret	256	29
Artillerikrater 1, sirkel ca 1 m fra sentrum i krater	20	-
Artillerikrater 2, nede i kratret	523	1,5
Artillerikrater 2, sirkel ca 1 m fra sentrum i krater	7,2	0,007
Artillerikrater 3, nede i kratret	482	19
Artillerikrater 3, sirkel ca 1 m fra sentrum i krater	9,0	0,1
Artillerikrater 4, nede i kratret	397	285
Artillerikrater 4, sirkel ca 1 m fra sentrum i krater	31	-

Tabell 3.1 Konsentrasjoner av hvitt fosfor i jordprøver tatt i Mål 1 etter nedslag av artillerigranater med anslagsbrannrør, målt samme dag og etter 8 måneder. – ikke prøvetatt.

Alle fire granatene med nærhetsbrannrør gikk av som forventet. Fra begge OPene var det mulig å se at granatene ble omsatt i lufta og ikke nede på bakken, noe Figur 3.4 illustrerer. Ut fra bildene er det mulig å beregne hvor høyt over bakken granatene går av. Man benytter da samme metode som for beregning av røykskyarealene, som er beskrevet i kapittel 2.2.1. Beregning av sprenghøyden er utført i kapittel 3.2.2. Fra bakken og opp til antatt detonasjonspunkt blir gjennomsnittshøyden for de fire granatene 11,7 meter. Dette er litt høyere enn oppgitt høyde på

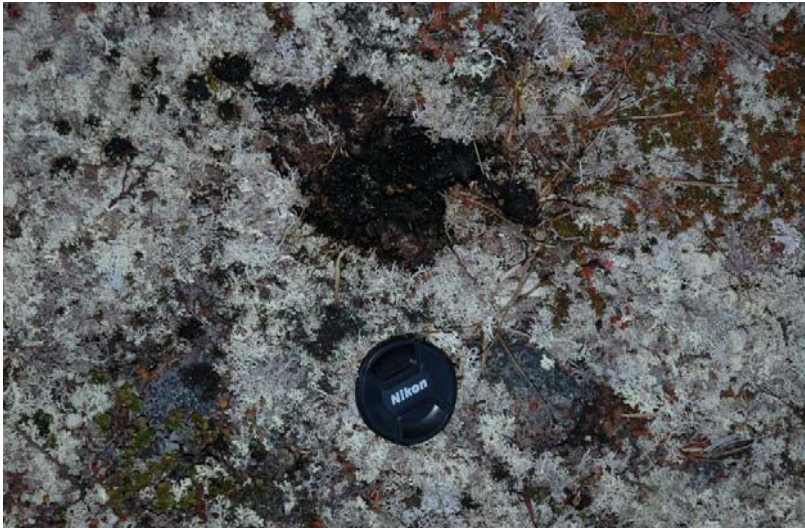
10 meter. Omsetning av granater med nærhetsbrannrør gir ikke kratre slik som anslagsbrannrør. Det er derfor vanskelig å si med sikkerhet hvor granatene har gått av. Ved undersøkelse av nedslagsområdet, ble vi gående rundt i et stort område for å fastslå hvor granatene hadde detonert. De 4 granatene har gått av ikke så langt fra hverandre (ca 65 meter), og det var ikke lett å skille nedslagene fra hverandre.



Figur 3.4 Bilder av artillerigranater med anslagsbrannrør (over) og nærhetsbrannrør (under) tatt i detonasjonsøyeblikket (til venstre) og 2-3 sekunder etter detonasjonen (til høyre)

Når granatene har gått av noen meter over bakken, har hvitt fosfor blitt kastet litt opp og utover i skyteretningen. Utkastet av hvitt fosfor vil følge retningen som granaten har og spres framover, siden granaten går av i lufta mens den er i fart. Fosfor som ikke har brent opp i lufta, har fortsatt å brenne på bakken og har etterlatt seg svi - og brennmerker på vegetasjonen, se Figur 3.5. Vegetasjonen i dette området består for det meste av reinmose og noe lav fjellbjørk. Det har dannet seg en liten gate av svi - og brennmerker i skyteretningen. Enkelte steder observeres små groper/sår på bakken hvor vegetasjonen er fjernet og jorda under er blottlagt, se Figur 3.6. Dette er sannsynligvis merker etter fragmenter fra granaten som har truffet bakken med stor hastighet

og flerret opp vegetasjonen. Disse gropene var avlange i skyteretningen og varierte i størrelse mellom 5 – 20 cm brede og 20 – 40 cm lange.



Figur 3.5 Svimerker på vegetasjonen etter bruk av artillerigranater med nærhetsbrannrør



Figur 3.6 Bilder av oppflerret vegetasjon i nedslagsfeltet fra artillerigranater med nærhetsbrannrør

Tabell 3.2 viser at mengdene med hvitt fosfor som er målt i nedslagsområdet for granater med nærhetsbrannrør er lave. Konsentrasjonen av hvitt fosfor ved bruk av nærhetsbrannrør er stort sett på samme nivå med det som ble funnet utenfor kratrene ved bruk av anslagsbrannrør, og langt lavere enn det som ble funnet nede i kratrene. Det er stor variasjon mellom laveste og høyeste konsentrasjon, noe som kan forklares med stor spredning av hvitt fosfor etter detonasjonen og at det var vanskelig å avgjøre nøyaktig posisjon for de ulike detonasjonene. Prøvene ble ikke tatt før seks timer etter detonasjonene, og det har derfor sannsynligvis foregått en betydelig nedbrytning av hvitt fosfor innen prøvetaking, noe som også kan være årsak til den store variasjonen i konsentrasjonen av hvitt fosfor.

Det er målt høyere verdier rundt den ene granaten, granat 1. Dette kan skyldes at hvitt fosfor fra flere granater har falt ned i samme område, slik at prøvetakingen for denne granaten er foretatt i

et område hvor det er rester fra flere av granatene. Verdiene viser imidlertid at det er lite rester av hvitt fosfor totalt i området, og at betydelig mer hvitt fosfor er omsatt ved bruk av nærhetsbrannrør enn ved bruk av anslagsbrannrør.

I Figur 3.4 vises bilder av artillerigranater med anslagsbrannrør og nærhetsbrannrør i detonasjonsøyeblikket og 2-3 sekunder etter. Etter studier av foto og film ser det ut til at det er mer hvitt fosfor som spres ut i et noe større område ved bruk av nærhetsbrannrør enn det som er tilfelle ved anslagsbrannrør. Granater med anslagsbrannrør kaster stor sett bitene med hvitt fosfor høyt opp i lufta, noe som fører til at oppholdstiden i lufta er større (ca 3 sekunder) og at spredningen er noe mindre enn ved bruk av nærhetsbrannrør. Granater med nærhetsbrannrør kaster et større antall biter med hvitt fosfor mer rett frem i skyteretningen, noe som fører til en litt større spredning av bitene og en kortere oppholdstid i lufta.

Prøvepunkt	Konsentrasjon av hvitt fosfor, mg/kg tørr prøve
Nedslag av fragmenter fra granat 1 med nærhetsbrannrør	33
Rundt detonasjonspunkt for granat 1 med nærhetsbrannrør	10
Nedslag av fragmenter fra granat 2 med nærhetsbrannrør	0,95
Rundt detonasjonspunkt for granat 2 med nærhetsbrannrør	0,046
Nedslag av fragmenter fra granat 3 med nærhetsbrannrør	0,83
Rundt detonasjonspunkt for granat 3 med nærhetsbrannrør	2,8
Nedslag av fragmenter fra granat 4 med nærhetsbrannrør	4,7
Rundt detonasjonspunkt for granat 4 med nærhetsbrannrør	4,7

Tabell 3.2 *Konsentrasjoner av hvitt fosfor i jordprøver tatt i Mål 2, nedslag av artillerigranater med nærhetsbrannrør*

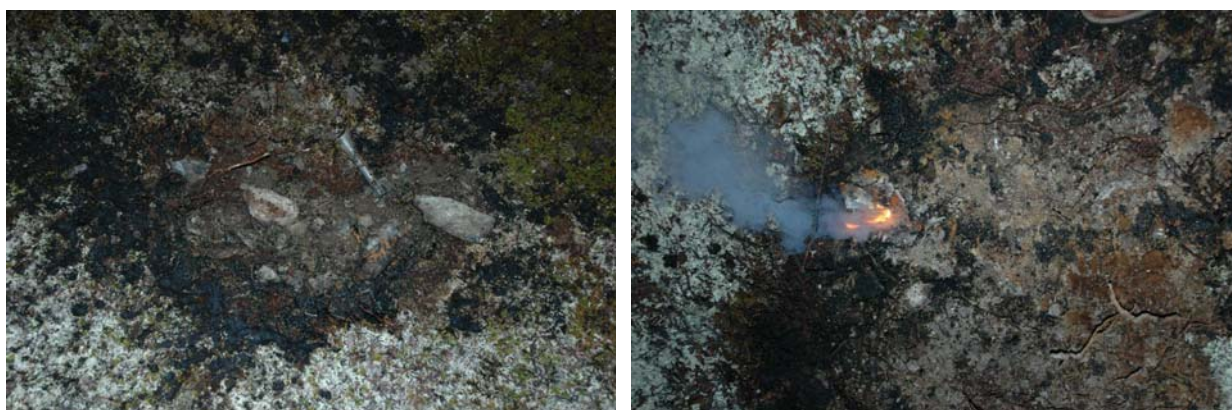
3.1.2 Bombekaster

Det var bare to av BK-granatene med anslagsbrannrør som gikk av som forventet. Den første av dem som feilet, gikk ikke av ved treff i bakken. Granaten ser ut til å sprette bortover bakken, før den blir liggende og avgi røyk mens det hvite fosforet brenner opp. Bildene som er tatt under forsøket viser at granaten antakeligvis har truffet en stein, delvist knust og av den grunn er blitt kastet bortover. Men om det er noen sammenheng med treffet av steinen og at granaten ikke har gått av, er umulig å si. Ved observasjon i nedslagsområdet ble imidlertid denne granaten funnet, og en kunne se at brannrøret var slått av og at hvitt fosfor brant inne i granaten (se Figur 3.7). I det andre tilfellet går heller ikke granaten av, og det er ikke mulig å observere nedslaget til granaten. Når vi her sier at granatene ikke er gått av, så menes det at sprengladningene ikke har detonert og at bøssingen ikke er sprengt.

De granatene som gikk av, har forårsaket små kratre. Kratrene er grunne groper der overflate- laget av jorden er fjernet, slik at underliggende jordlag kommer til syne (se Figur 3.8). Størrelsen på kratrene er ca 0,5 – 1,5 m i diameter. Rundt kratrene er det brenn- og svimerker, 10-20 cm tykke belter, noe som tyder på at hvitt fosfor blir liggende i kratret å brenne etter detonasjon (se Figur 3.9).



Figur 3.7 BK-grenater med anslagsbrannrør som ikke detonerte. Til venstre en BK-grenat som spratt flere titalls meter etter treff og som ved treff sannsynligvis er blitt revet opp slik at innholdet av hvitt fosfor antente. Til høyre en BK-grenat som har fått brannrøret avslått og der en kan se at innholdet av hvitt fosfor brenner inne i granaten



Figur 3.8 Nedslagspunkter/kratrer for BK-grenater med anslagsbrannrør

Den første granaten med nærhetsbrannrør gikk ikke av som forventet, og røykutviklingen fra denne var liten. De tre andre BK-grenatene med nærhetsbrannrør gikk av som de skulle. Fra observasjonsposten på Rollstadsætri var det ikke lett å avgjøre om granatene gikk av på bakken eller i lufta. Når man studerer bildene og filmen fra skytingen, kan man imidlertid se at granatene går av i lufta. Beregnet avstand fra bakken til overkant av røykskya er gjennomsnittlig 3,4 meter for de tre granatene, se kapittel 3.2.2, og detonasjonspunktet er nok litt lavere.

Dette samsvarer bra med oppgitt detonasjonshøyde på 3 meter for nærhetsbrannrøret.

Når granaten går av i lufta, resulterer dette i at det nesten ikke blir noen kraterdannelse. Det blir imidlertid dannet en ganske stor ring med svidd vegetasjon på bakken, se Figur 3.10. Diameteren på ringen er ca 1,5 – 2 meter. Ringen viser spredningen av fosforet. Nærhetsbrannrøret har antageligvis gått av for nær bakken til å sørge for en stor spredning av fosforpartiklene. Det hadde vært ønskelig at detonasjonen skjedde høyere over bakken slik at fosforet kunne bli spredd mer.

BK-granatene ankommer bakken i en ganske rett vinkel. Når granatene med nærhetsbrannrør går av i lufta, vil hvitt fosfor følge banen ned mot bakken og bli kastet nedover. Når dette skjer i kort avstand over bakken, vil mye hvitt fosfor ikke rekke å brenne opp før det når bakken. Hvitt fosfor vil da etterlate slike sterke brennmerker som det observeres her. Granatene med anslagsbrannrør, som går av på bakken, vil slenge hvitt fosfor opp fra bakken, og hvitt fosfor vil bli kastet opp i lufta og utover og så dale ned. Slik vil partiklene få en lengre oppholdstid i lufta og tid til forbrenning med anslagsbrannrør samt at spredningen blir bedre. Nærmere forklaring og illustrasjon av dette er gitt i kapittel 3.2.5 og hvilke følger dette får for røykdannelsen.



Figur 3.9 *Kratre med brennmerker fra BK-granater med anslagsbrannrør*

På de to granatene med anslagsbrannrør som gikk av, ble halepartiet funnet begravd i bakken innenfor kratret, se Figur 3.11. Ved bruk av nærhetsbrannrør ble halepartiet ikke funnet i

nærheten av de brente ringene på bakken som markerer detonasjon av granatene. Det at granaten går av over bakken, hindrer dermed halepartiet i å bli presset ned i bakken. Dette fjerner en kilde til at rester av hvitt fosfor blir liggende i lengre tid uforbrent. Når halepartiet blir liggende oppe på bakken, vil det bli lufttilgang slik at eventuelle partikler av hvitt fosfor som sitter på denne granatdelen raskt forbrennes.



Figur 3.10 Nedslagspunkter fra BK-granater med nærhetsbrannrør



Figur 3.11 Haleparti fra BK-granat skutt med anslagsbrannrør

3.2 Røykutspredningen

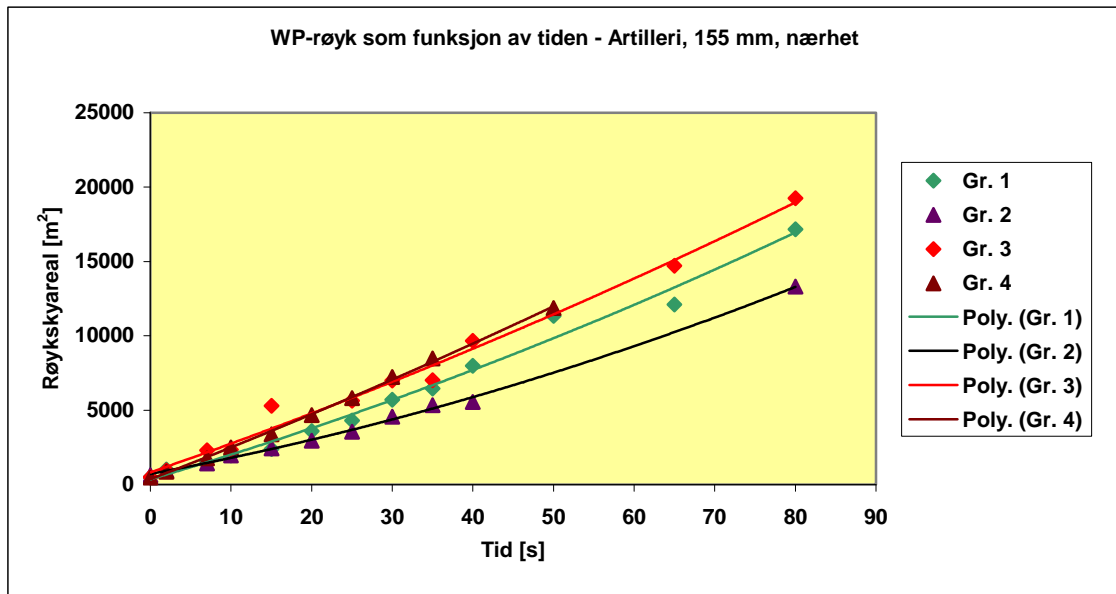
3.2.1 Artilleri - Røykskyarealer

Det ble skutt fire granater med anslagsbrannrør og fire granater med nærhetsbrannrør. Tabell 3.3 viser de beregnede røykarealene som funksjon av tiden. Tabellen angir også vindhastighet med retning samt temperatur, målt ca 2 m over bakken. I Figur 3.12 og Figur 3.13 er røykarealene vist grafisk for granater med nærhetsbrannrør, og i Figur 3.14 og Figur 3.15 er røykarealene vist grafisk for granater med anslagsbrannrør. Startbilder for hver av de skutte granatene er vist i Figur 3.16. I Figur 3.17 er det laget en montasje av overlappende bilder av røykutviklingen fra granat nr 1 med anslagsbrannrør. Tilsvarende montasjer av de øvrige skytinger med artillerigranater (FA) er vist i Appendiks E.

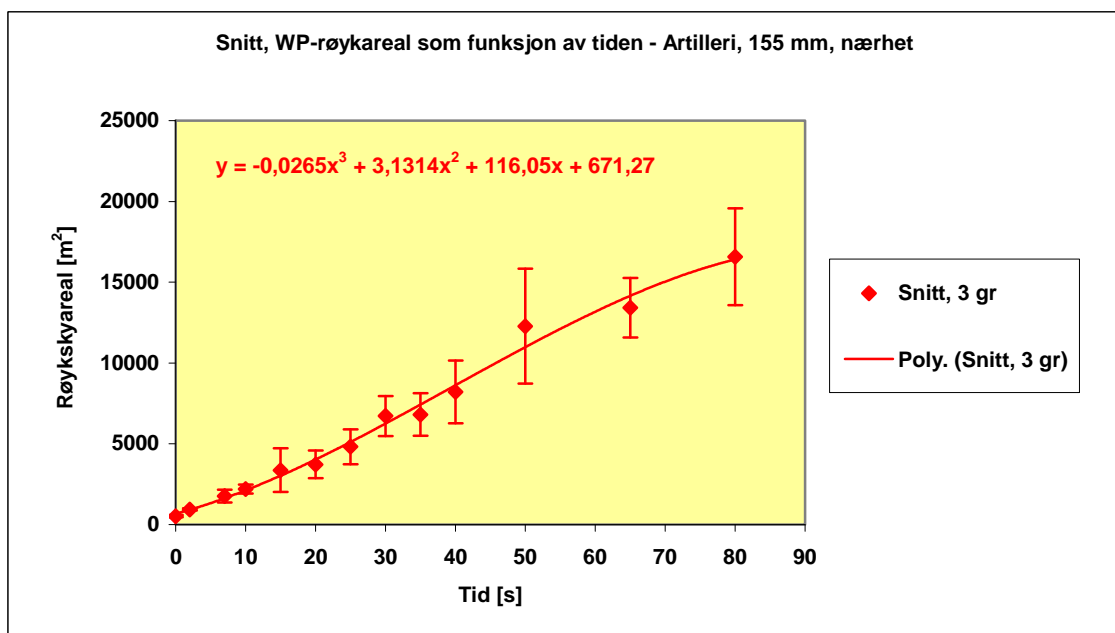
Skudd nr.	Ammo. type	RØYKAREAL, m ²												Vind		Temp °C	
		REF	2 S	7 S	10 S	15S	20 S	25 S	30 S	35 S	40 S	50 S	65 S	80 S	ret.		m/s
1	Ansl.	262	554	851	1117	1519	1952	2404	2733	3356	3705	4767	6670	8467	187	1,4	2,7
2	"	217	320	875	1112	1695	2322	2840	3365	4056	4562	5782	7508	10273	211	1,4	2,4
3	"	172	273	694	912	1226	1659	2052	2924	3246	4157	5739	7902	10507	9	1,5	3
4	"	211	502	744	1130	-	2369	3004	3221	4374	-	5969*	11418**	13913**	81	1,5	2,5
5	Nærh.	501	1020	1535	1963	2391**	3586**	4303**	5710**	6444**	7989**	11347**	12115**	17162**	168	0,2	2,8
6	"	625	917	1424	1964	2441	2944	3544	4569*	5337*	5547*	-	-	13319*	168	1,3	3,6
7	"	496	943	2305	2354	5294	-	5634	6998*	7014	9653	13625	14717	19249	191	1,1	4,2
8	"	463	861	1762	2505	3371	4661	5807	7234	8480	9650	11866	-	-	237	1,6	4,1

* Bildet dekker ikke hele røykskyen, noe usikker beregning ** Mye tynn røyk i motlys, usikker beregning

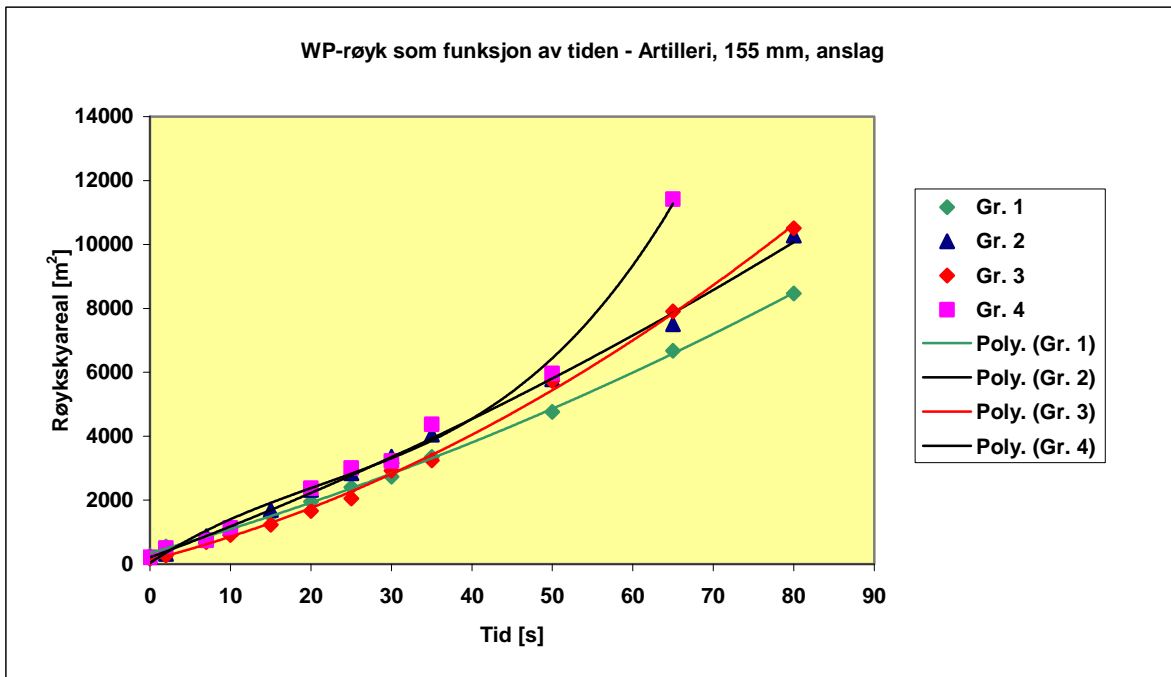
Tabell 3.3 WP-røyk fra 155 mm FA-granater med anslag- og nærhetsbrannrør. Røykareal (m²) som funksjon av tiden. Målt vindretning er usikker pga lav vindhastighet.



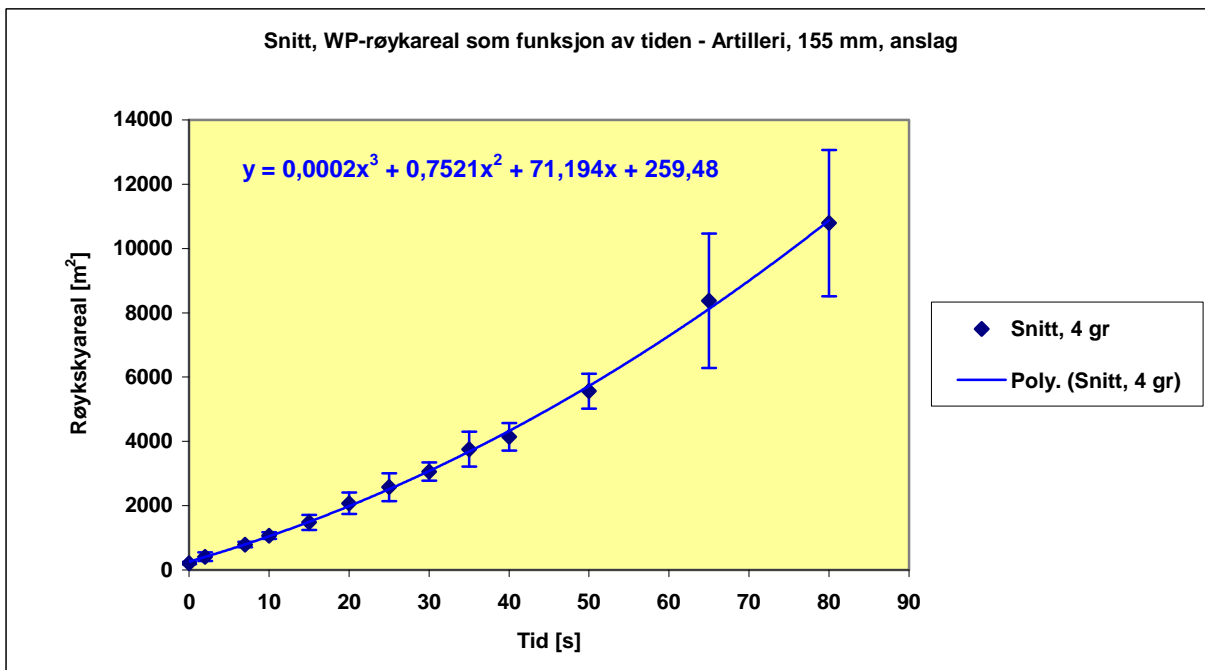
Figur 3.12 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 155 mm WP-granater med nærhetsbrannrør



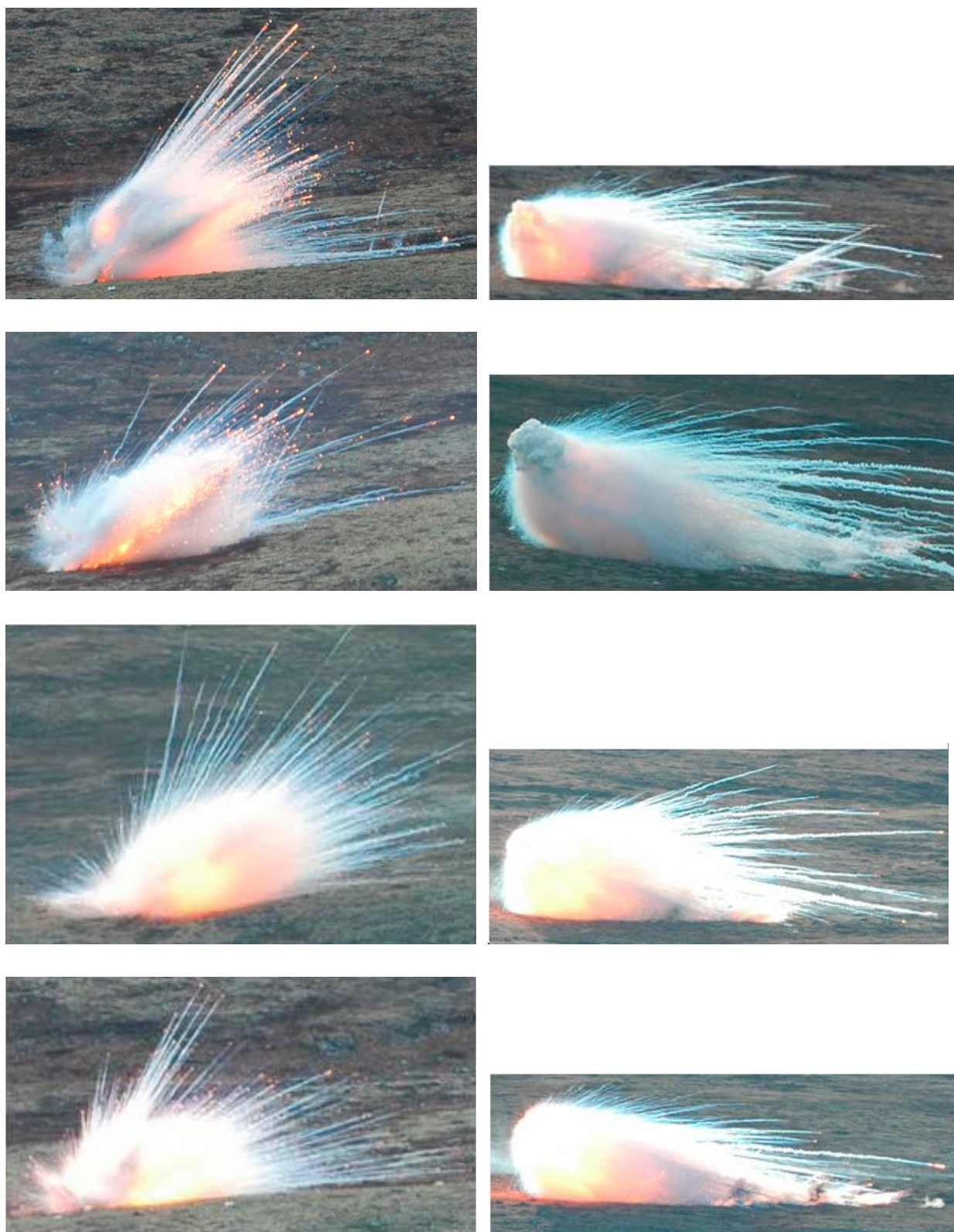
Figur 3.13 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 3 stk 155 mm FA-granater med nærhetsbrannrør, gjennomsnittsverdier med standardavik



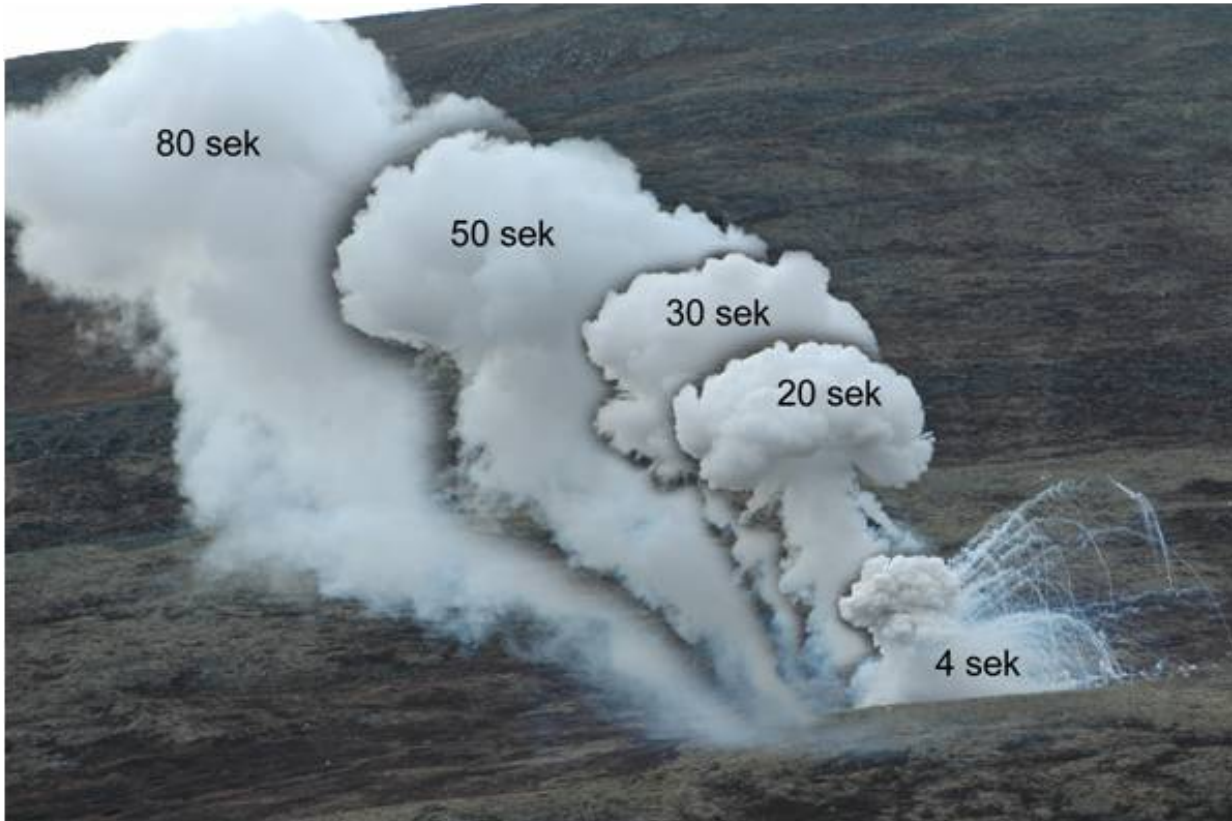
Figur 3.14 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 155 mm WP-granater med anslagsbrannrør



Figur 3.15 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 4 stk 155 mm WP-granater med anslagsbrannrør, gjennomsnittsverdier med standardavvik



Figur 3.16 Startbildene for hver av granatene i Tabell 3.3, anfallsbrannrør til venstre og nærhetsbrannrør til høyre



Figur 3.17 Utvikling av WP-røyk, 155 mm FA, granat nr 1 med anslagsbrannrør, 1,4 m/s vindhastighet i snitt, observasjon fra Rollstadsætri

3.2.2 Spreng høyder - nærhetsbrannrør

Spreng høyden for artillerigranater med nærhetsbrannrør skal ligge i området 10 - 14 m over bakken, avhengig av endevinkel ved omsetningen og litt av forholdene på bakken, f eks om bakken er dekket med snø eller ikke. For BK-granater med nærhetsbrannrør er spreng høyden 3 – 7 meter. Det er antatt at granatene sprenges i sentrum av den del av røykskyen som ligger høyest, og for noen av sprengningene, har form som en tilnærmet rund ”dott” med høy røykkonsentrasjon. For å beregne høyden over bakken til det antatte sprengpunktet, ble det laget et Matlab-script, se Appendiks C og D, basert på de samme prinsipper som ble benyttet for arealberegningene. I Figur 3.18 er det vist bilde av den første artillerigranaten som ble sprengt med nærhetsbrannrør, 1-2 sek etter omsetning, med beregnet spreng høyde på 11,8 m. Gjennomsnittlig spreng høyde for samtlige fire artillerigranater ble beregnet til 11,7 m med standardavvik 0,6 m. Det er derfor nærliggende å anta at den anvendte metoden gir brukbare resultater for høydeberegningene, og derved at de beregnede røykskyarealene er realistiske.



```
>> wulvik3c
Gi filnavn: 'DSC_0236.JPG'
Avstand til nedslag: 2000
Dra i endepunktene på linjen for å plassere den slik du ønsker!
Trykk ENTER når justeringen er gjort!
Warning: Image is too big to fit on screen; displaying at 33%
> In imuitools\private\initSize at 86
  In imshow at 201
  In Wulvik3c at 37
Distansen er 11.8 m
```

Figur 3.18 Eksempel av utskrift ved beregning av spreng høyde for 155 mm FA, røykgranat, med nærhetsbrannrør

3.2.3 Bombekaster – røykskyarealer

Det ble skutt fire granater med anslagsbrannrør. En av disse traff bakken uten omsetning. Den rikojetterte og avga små mengder med røyk over lang tid. Den andre rikojetterte også ved anslag, dog under utvikling av større mengder røyk før den ble liggende, og røykutviklingen ble normal. Denne røykskyen ble registrert, som nr 3 i Tabell 3.4 og Tabell 3.5. Det første røykarealet fra denne granaten ble beregnet ut fra bildet der den først traff bakken. Dette er årsaken til at dette arealet er på bare 60 m^2 sammenliknet med ca 230 m^2 for de to andre ”normale” omsetningene. Denne noe unormale røykutspredningen er også tatt med i analysen. Det ble registrert én blindgjenger blant de fire granatene med nærhetsbrannrør. De resterende 3 granatene hadde en normal omsetning.

Tabell 3.4 viser de beregnede røykskyarealene som funksjon av tiden, basert på bildene som ble tatt under skytingene. Det ble tatt relativt få bilder totalt slik at det ikke ble funnet bilder med felles tidspunkter for å kunne gjøre statistiske beregninger. En egen tabell med arealene ved felles tidspunkter etter omsetning, ble derfor beregnet, se Tabell 3.5. Denne tabellen angir også vindhastighet med retning samt temperatur, målt ca 2 m over bakken.

I Figur 3.19 og Figur 3.20 er røykarealene vist grafisk for granater med nærhetsbrannrør, og i Figur 3.21 og Figur 3.22 er røykarealene vist grafisk for granater med anslagsbrannrør. I Figur 3.23 er det laget en montasje av overlappende bilder av røykutviklingen fra granat nr 1 med anslagsbrannrør. Tilsvarende montasjer av de øvrige skytingene er vist i Appendiks F.

Spreng høyder for de tre granatene med nærhetsbrannrør er vanskelig å beregne. Det første bildet i hver fotoserie ga ingen antydning av sprengpunktet. Imidlertid, avstanden fra bakken opp til overkant av røykskyene ble beregnet til 3,6 m, 3,6 m og 3,4 m. Dette kan bety at granatene har gått av så nær bakken de kan med bruk av nærhetsbrannrør for BK-granater.

Bk Granat 1, anslagsbrannrør

Tid, s	Ref	2	6	12	19	29	37	58
Areal, m ²	227	489	919	1798	2869	4913	6074	10601

Granat 2, Bk, anslagsbrannrør

Tid, s	Ref	2	7	10	18	27	40	61
Areal, m ²	234	353	944	1296	2630	4401	7260	12662

Granat 3, Bk, anslagsbrannrør

Tid, s	Ref	2	8	20	37
Areal, m ²	60	464	1143	2717	4245

Granat 1 Bk, nærhetsbrannrør

Tid, s	Ref	4	8	13	23	32
Areal, m ²	75	446	855	1536	3178	4448

Granat 2, Bk, nærhetsbrannrør

Tid, s	Ref	3	7	10	18	33	44	60
Areal, m ²	72	214	641	903	1596	3311	4135	4838

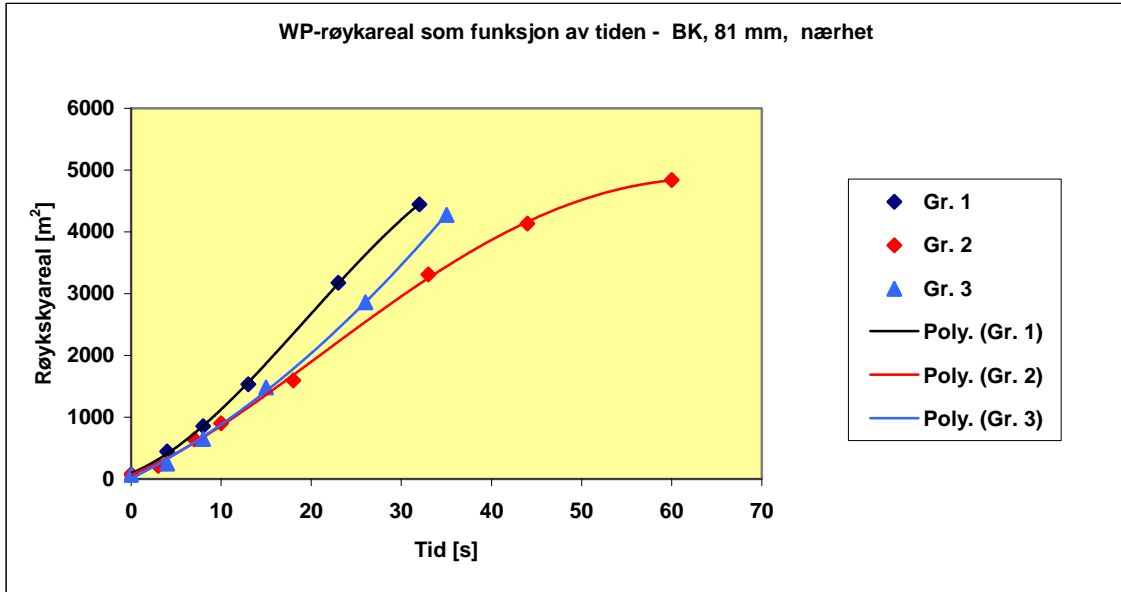
Branat 3, Bk, nærhetsbrannrør

Tid, s	Ref	4	8	15	26	35
Areal, m ²	68	248	650	1481	2860	4276

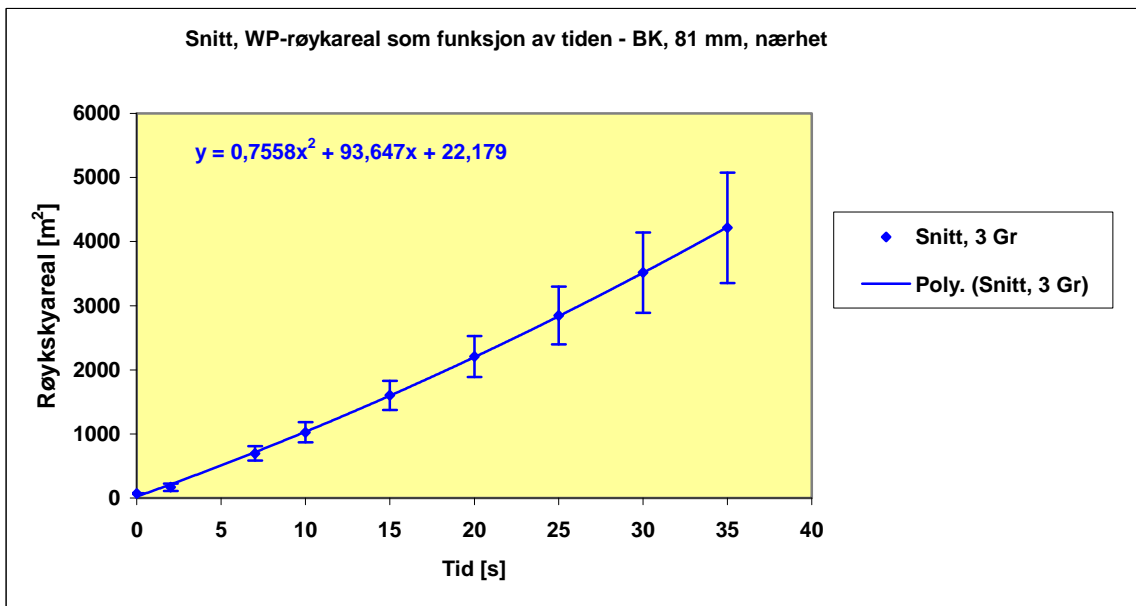
Tabell 3.4 Røykskyarealer som funksjon av tiden etter detonasjon for hver BK-granat. På grunn av et begrenset antall bilder fra hver skyting, kunne ikke en felles tidsskala benyttes direkte. Arealer med felles tidsskala ble derfor beregnet og er vist i Tabell 3.5

Gr. nr	Br.rør	RØYKAREAL, m ²									Vindr. grader	Vindh. m/s	Temp °C
		Ref.	2 s	7 s	10 s	15 s	20 s	25 s	30 s	35 s			
1	Anslag	227	489	1132	1567	2326	3127	3971	4858	5787	239	4,9	3,1
2	”	234	353	1000	1428	2200	3045	3962	4952	6015	226	3,9	2,9
3	”	60	385	1087	1485	2107	2679	3202	3675	4097	236	4,2	3,0
1	Nærhet	75	231	816	1192	1859	2577	3347	4167	5038	236	2,8	3,0
2	”	75	117	681	1005	1524	2015	2478	2913	3321	255	2,9	3,1
3	”	68	159	591	883	1424	2035	2716	3465	4284	240	2,8	3,1

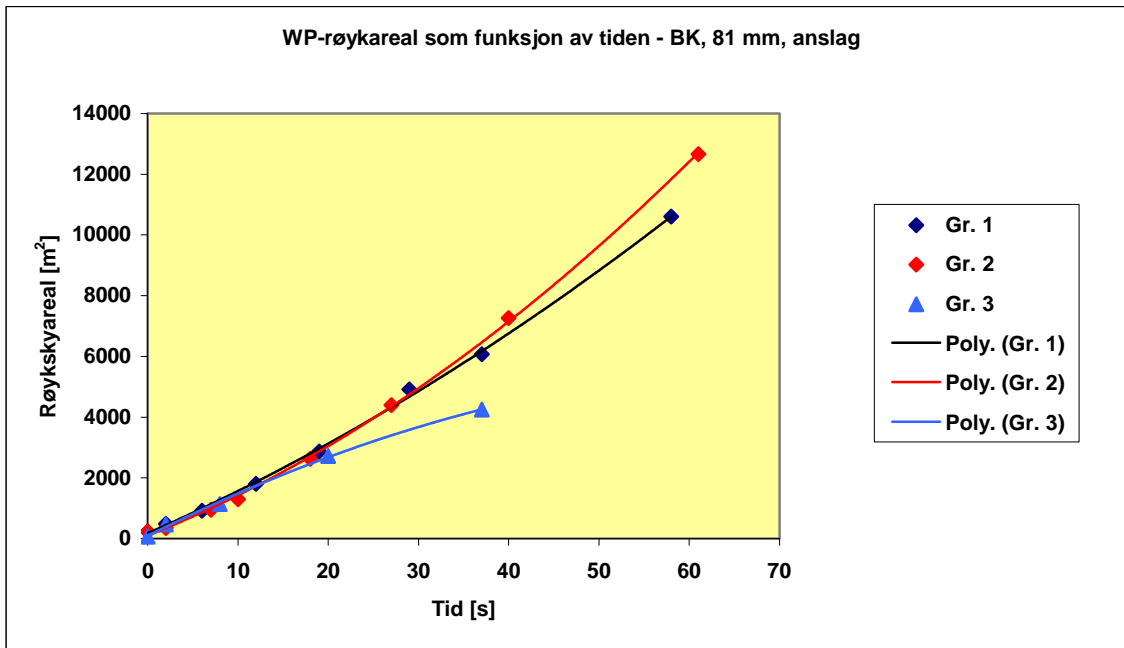
Tabell 3.5 WP-røyk fra 81 mm bombekastergranater med anslag- og nærhetsbrannrør som funksjon av tiden. For å finne arealene som funksjon av en felles tidsskala måtte noen av arealene beregnes ut fra data i Tabell 3.4.



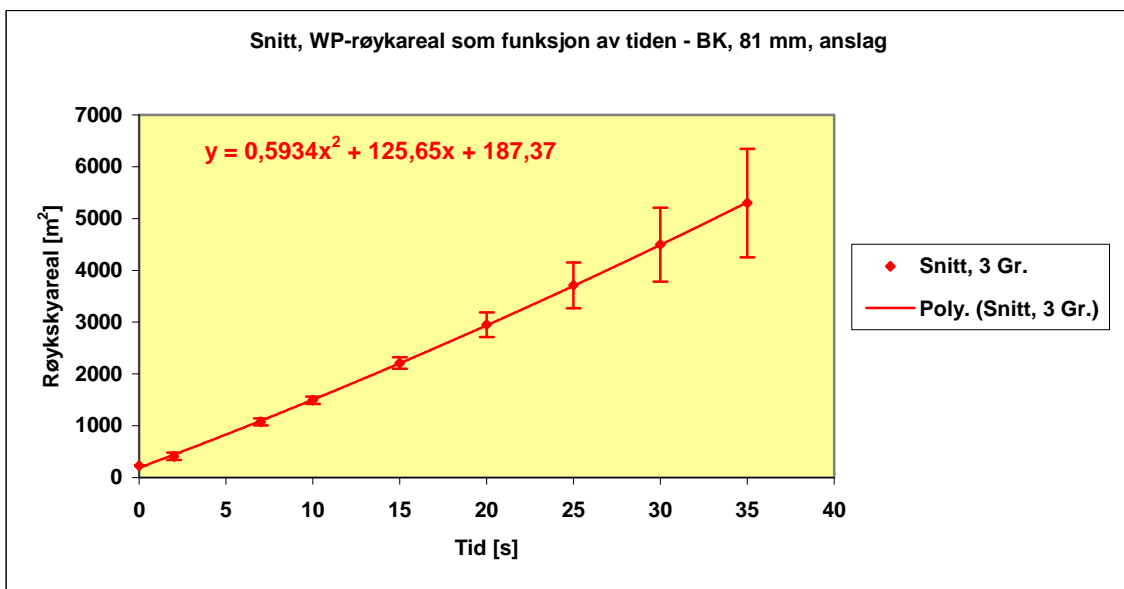
Figur 3.19 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 81 mm WP-granater med nærhetsbrannrør



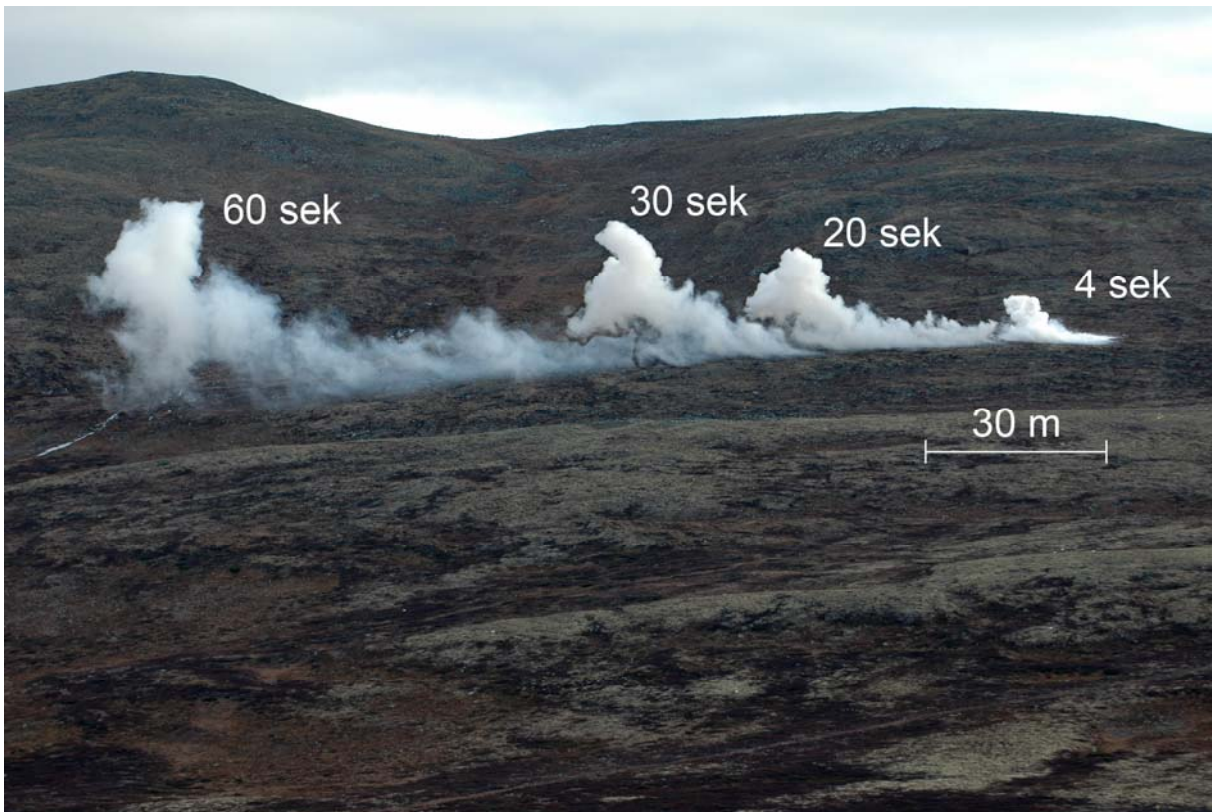
Figur 3.20 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 3 stk 81 mm WP-granater med nærhetsbrannrør, gjennomsnittsverdi med standardavvik



Figur 3.21 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 81 mm WP-granater med anslagsbrannrør



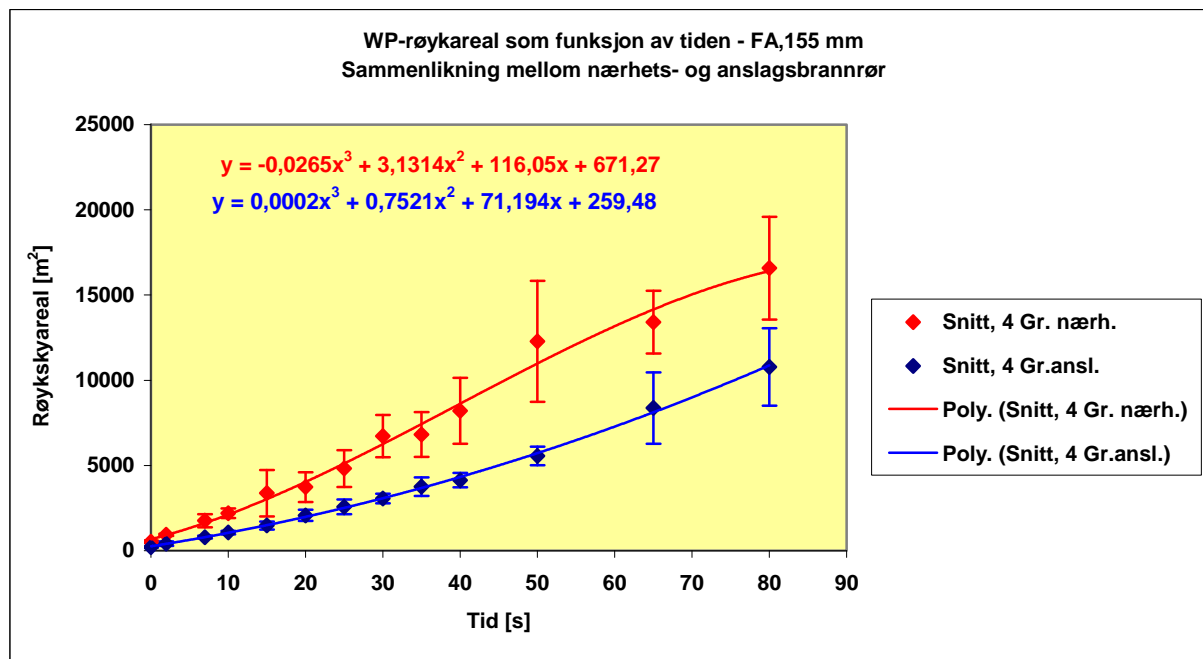
Figur 3.22 Grafisk framstilling av røykskyarealer som funksjon av tiden, 3 stk 81 mm WP-granater med anslagsbrannrør, gjennomsnittsverdi med standardavvik



Figur 3.23 Utvikling av WP-røyk, 81 mm BK, granat nr 1 med anslagsbrannrør, 4,9 m/s vindhastighet i gjennomsnitt, observasjon fra Rollstadsætri

3.2.4 Røyklegging, 155 mm FA – sammenlikning av brannrørtype

I Figur 3.24 er det satt opp gjennomsnittskurver over røykskyarealer som funksjon av tiden for 155 mm artilleriammunisjon med nærhets- og anslagsbrannrør, der hver kurve er basert på fire granater. Hovedfaktorene som bestemmer hvor raskt røykskyen vokser er utspreddingseffektiviteten av røyksatsen, vindstyrken i nedslagsområdet fra 6 til 200 m over bakken, samt graden av varmeløft som skyldes forbrenningen av hvitt fosfor. For en observatør vil også vindretningen være en faktor som bestemmer hvor raskt det observerte røykarealet vokser. Varmeløftet skjer innenfor et tilnærmet likt volum for begge typer brannrør. Omsettes granatene derimot i en større høyde over bakken ved hjelp av tidsbrannrør, vil utspreddingen dekke et betraktelig større volum med følgelig mindre varmeløft. Den gjennomsnittlige vindhastigheten med standardavvik for skytingene med nærhetsbrannrør og anslagsbrannrør var henholdsvis 1,05 m/s (0,6) og 1,45 m/s (0,06), målt 2 m over bakken. Forskjellen i vindstyrke på 0,40 m/s i favør av skytingene med anslagsbrannrør, skulle tilsi en litt raskere spredning av denne røyken. Gjennomsnittlig røykskyareal i startpunktet (kalt referansepunktet) med standardavvik er 510 m² (71) og 213 m² (37) for henholdsvis ammunisjon med nærhetsbrannrør og anslagsbrannrør, se Tabell 3.3. Dette er et forventet resultat, siden utspreddingen av røyksatsen bør være mer effektiv med et nærhetsbrannrør. Det er også å forvente ved anvendelse av anslagsbrannrør, at noe av røyksatsen vil bli liggende tildekket i bakken og ikke produsere røyk.

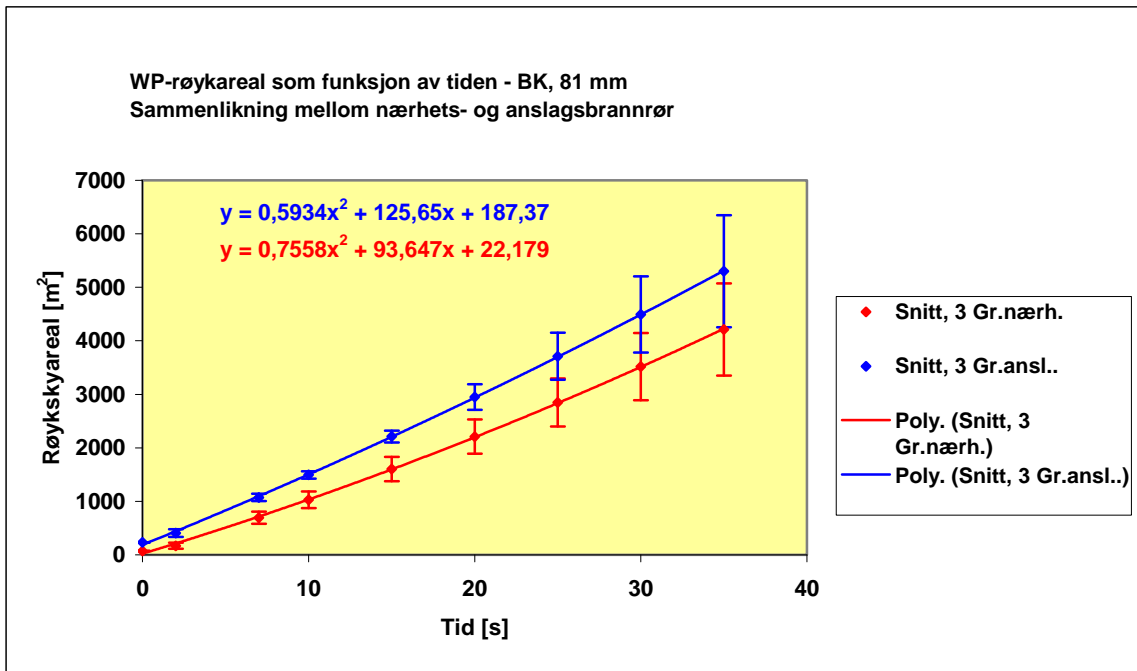


Figur 3.24 Sammenlikning av røykarealer som funksjon av tiden for 155 mm FA, WP-røykammunisjon, med nærhets- og anslagsbrannrør

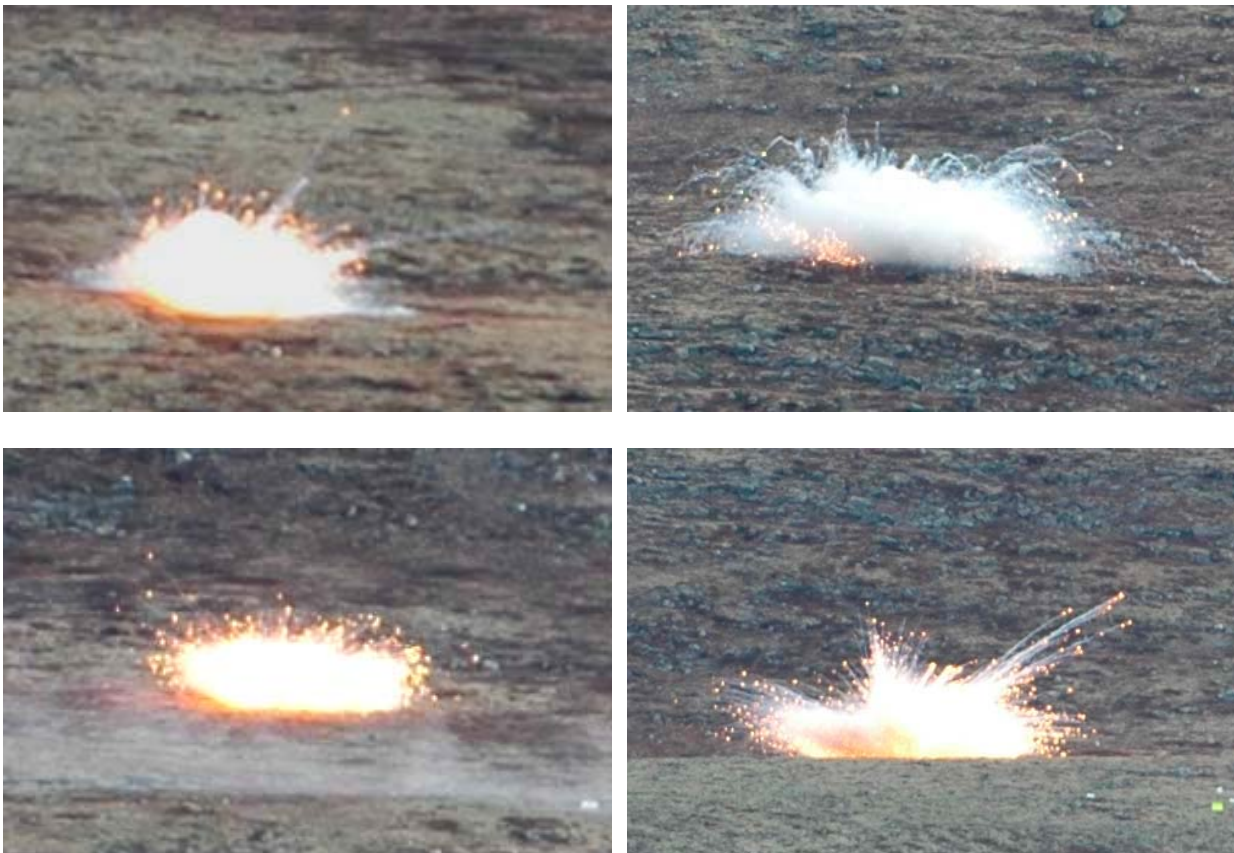
Kurven tilknyttet ammunisjonen med nærhetsbrannrør i Figur 3.24 indikerer at et stort røykskyareal i starttidspunktet er viktig for utvikling av en røykskjerm. Røykskyarealet i starttidspunktet for granatene med anslagsbrannrør er mindre, og følgelig utvikler røykskjermen seg noe saktere til tross for at vindhastigheten var noe større under disse skytingene. Det er derfor viktig at røyksatsen blir spredd ut i et størst mulig luftrom ved omsetning av granaten.

3.2.5 Røyklegging, 81 mm BK – sammenlikning av brannrørtype

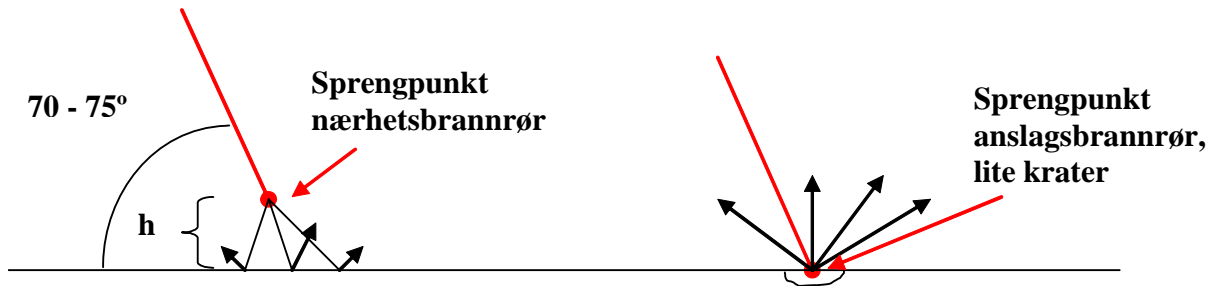
I Figur 3.25 er det satt opp gjennomsnittskurver over røykskyarealer som funksjon av tiden for 81 mm BK-ammunisjon med nærhets- og anslagsbrannrør. Hver kurve er basert på tre granater. I likhet med 155 mm FA, var det nærliggende å forvente at granatene med nærhetsbrannrør ville utvikle et større røykskyareal enn granatene med anslagsbrannrør. Imidlertid er det motsatte tilfelle. Startarealet av røykskyen fra granatene med nærhetsbrannrør er ca 70 m², mot ca 230 m² for de to granatene med anslagsbrannrør og normal omsetning, det vil si ca tre ganger større. Se forøvrig bildene av disse røykskyene i Figur 3.26. Vindstyrken var dog noe høyere under skytingene med anslagsbrannrør, men det gir ingen forklaring på det vesentlig høyere startarealet. En mulig forklaring kan være den relativt store endevinkelen for granatene med nærhetsbrannrør kombinert med et sprengpunkt nær bakken, se kapittel 3.2.3. Partiklene av hvitt fosfor blir således spredd i retning *ned* mot bakken over et relativt lite område sammenliknet med fosforpartiklene fra granater med anslagsbrannrør som på grunn av sprengningen ved anslag, blir spredd mer effektivt *opp* fra bakken i en stor romvinkel, se Figur 3.27.



Figur 3.25 Sammenlikning av røykarealer som funksjon av tiden for 81 mm WP-røykammunisjon med nærhets- og anslagsbrannrør



Figur 3.26 Startbildene for de to første BK-granatene i Tabell 3.1, nærhetsbrannrør til venstre og anslagsbrannrør til høyre

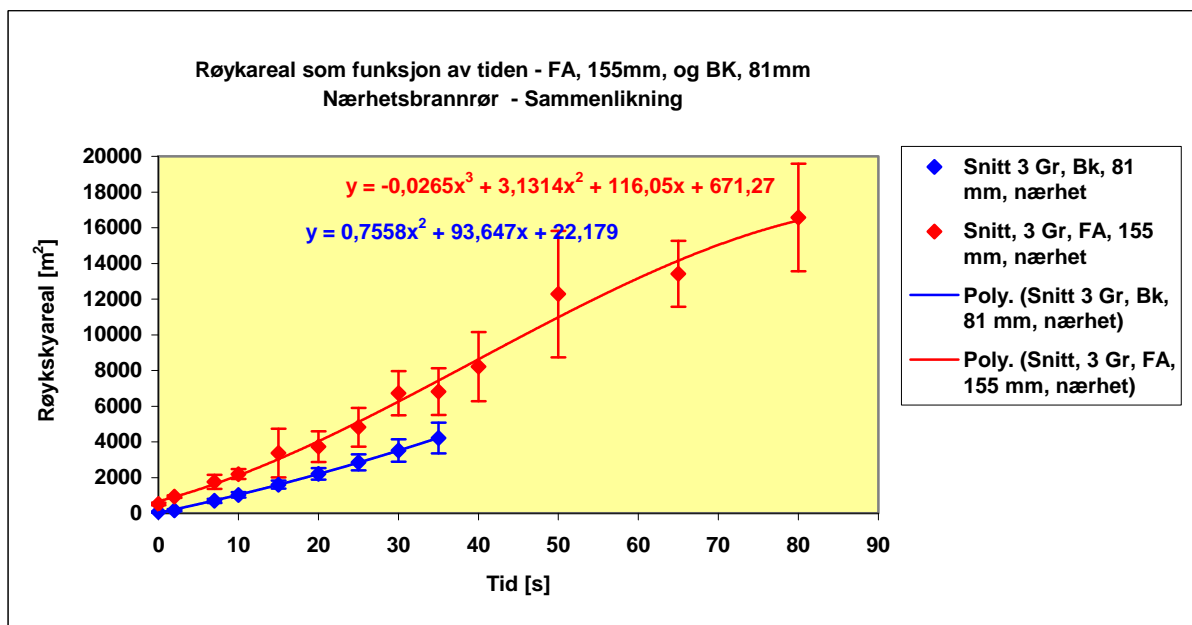


Figur 3.27 Skisse av virkemåte for BK røykgranat. Nærhetsbrannrør til venstre, $h < 3.6$ m, anslagsbrannrør til høyre

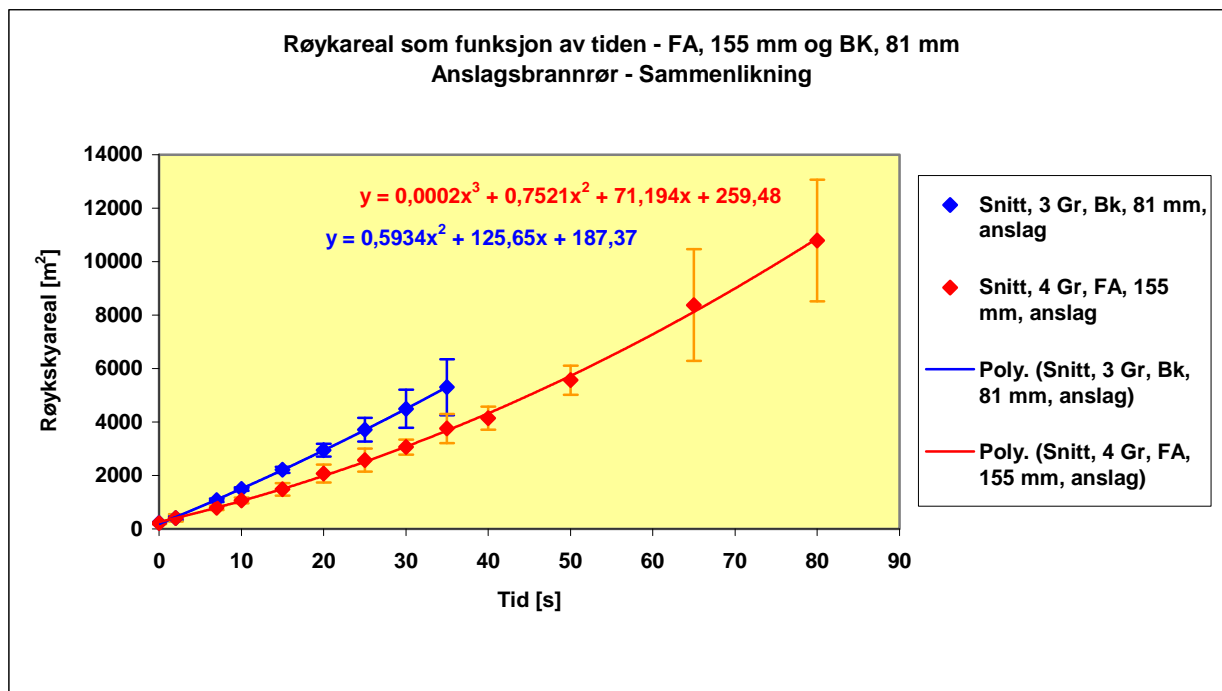
Bildemontasjen i Figur 3.26 kan tyde på at dette er riktig. Til sammenlikning omsettes artillerigranatene under en mindre endevinkel, og fosforpartiklene blir derved spredd mer forover og delvis oppover i skyteretningen over et større område, konferer bildene til høyre i Figur 3.16. Dette forholdet kombinert med at nærhetsbrannrørene omsetter granatene i en større høyde over bakken, medfører at artillerigranater med nærhetsbrannrør er mer effektive enn de med anslagsbrannrør. Artillerigranater med anslagsbrannrør trenger dessuten lengre ned i bakken før de omsettes, og effekten fra disse granatene reduseres derved ytterligere.

3.2.6 Røyklegging, 81 mm BK og 155 mm FA – sammenlikning

I Figur 3.28 er ammunisjon med nærhetsbrannrør for 81 mm BK og 155 mm FA sammenliknet. Som forventet og som også figuren viser, gir artillerigranaten et større røykskyareal med lengre varighet enn BK-granaten. Denne sammenlikningen er imidlertid ikke av noen vesentlig betydning da den taktiske anvendelse av disse to typer røykleveringsmidlene er noe forskjellig. I Figur 3.29 er ammunisjon med anslagsbrannrør for 81 mm BK og 155 mm FA sammenliknet.



Figur 3.28 Sammenlikning av røykarealer som funksjon av tiden for 155 mm FA og 81 mm BK, med nærhetsbrannrør



Figur 3.29 Sammenlikning av røykarealer som funksjon av tiden for 155 mm FA og 81 mm BK med anslagsbrannrør

Figur 3.29 viser at BK-granaten med anslagsbrannrør, både gir en litt større skjerm i utgangspunktet (ca 230 m² for BK mot ca 213 m² for artillerigranaten) og at denne også vokser raskere så lenge røyken kan sies å være effektiv. Den noe hurtigere utviklingen av BK-røyken kan også delvis skyldes en litt høyere vindhastighet under BK-skytingene med anslagsbrannrør. FA-røyken har imidlertid lengre varighet før den begynner å tynnes ut. Dette skyldes at røykkonsentrasjonen i hoveddelen av røykskyen naturlig nok er vesentlig større for FA-røyken.

Denne sammenlikningen kan imidlertid være til nytte ved at den illustrerer en noe lav utnyttelsesgrad av hvitt fosfor i artillerigranaten med anslagsbrannrør når det gjelder effektiv røyklegging. Denne granaten inneholder ca fire ganger mer fosfor (7100 g mot 1855 g) og ca ti ganger mer bristoladning (tetrytol) (380 g mot knapt 40 g) sammenliknet med tilsvarende BK-granat. Ved anslag lager BK-granaten et meget lite krater. Mesteparten av det hvite fosforet blir derved kastet opp fra bakken i en stor romvinkel og omsatt til røyk innenfor et relativt stort luftvolum. Det uønskede varmeløftet blir derved mindre. Artillerigranaten derimot, omsettes på bakken og danner et krater. Fosforet spres i dette tilfelle mer konsentrert opp fra bakken i en mindre romvinkel med vesentlig større varmeutvikling innenfor et mindre luftvolum. Det dannes en mer utpreget ”soppformig” røyksky med et hurtig varmeløft og med en høy røykkonsentrasjon i toppen av skyen. En vesentlig del av denne røyken i toppen vil ikke komme til nytte i en skjermingsrolle nær bakken. Noe fosfor blir også liggende tildekket og uforbrent i krateret.

3.3 Oppfølging – videre arbeid

Til bombekastergranater er det lite utvalg av nærhetsbrannrør i Norge. Det var tilgjengelig bare ett slikt brannrør som passet til den ene av BK-granatene med hvitt fosfor. Dette nærhetsbrannrøret gikk av ganske nær bakken, og spredningen av hvitt fosfor har ikke vært god. Ut fra et miljøperspektiv ser det ut til at bruk av nærhetsbrannrør kan gi mindre rester av hvitt fosfor i og med at det ikke blir dannet krater og at halepartiet ikke blir presset ned i bakken. Bruk av dette brannrøret gav imidlertid mindre mengder røyk, slik at det ut fra et operativt synspunkt ikke vil være gunstig å benytte denne typen nærhetsbrannrør. Det er derfor ønskelig å teste ut granaten med et nærhetsbrannrør som går av lenger oppe i lufta for å spre hvitt fosfor mer og danne mer røyk. Utfordringen blir å finne et slikt brannrør med dimensjoner som passer til hvitt fosforgranatene. Hvis mulig vil forsøket med BK-granatene gjentas med annet brannrør.

Gjeldende anbefalinger fra Forsvaret angående bruk av hvitt fosforgranater forbyr bruk på snø. Mange soldater er i tjeneste når det er vinter, og disse soldatene vil dermed ikke kunne trene med hvitt fosforgranater. Når hvitt fosfor faller ned på snø, vil det slutte å brenne, og det kan bli liggende rester av hvitt fosfor på snøen. Når snøen smelter, vil disse partiklene med hvitt fosfor kunne bli fraktet vekk sammen med smeltevannet til bekker, elver eller andre ansamlinger av vann. I andre tilfeller vil disse partiklene kunne bli liggende igjen på bakken etter at snøen har smeltet. Når underlaget så tørker opp, vil hvitt fosfor som ligger der kunne brenne opp. Hva som egentlig skjer ved skyting på snø, og i løpet av smelteprosessen, er imidlertid ikke helt avklart. Observasjon av kratre etter skyting på snø, tyder på at kraterdannelsen er liten, og det er lite rester av hvitt fosfor. Det er ønskelig fra FFI sin side å gjennomføre forsøk med skyting på snø for å få en avklaring omkring disse forholdene. Forsøkene som beskrives i denne rapporten vil da bli fulgt opp av tilsvarende forsøk på vinteren slik at nedslagene blir på snø.

FFI har i flere år tatt prøver i enkelte hvitt fosforkratere i Hjerkinnskyte- og øvingsfelt. Dette gjøres for å holde øye med mengden hvitt fosfor i kratrene og for å følge med på nedbrytningen av hvitt fosfor. Kratrene fra dette forsøket vil fra nå av inngå i dette prøvetakingsprogrammet. Dette siste nedslagsfeltet er valgt ut til å være ideelt for WP-granater, noe som viser seg i de lave WP-verdiene som er målt. I så måte er det interessant å sammenlikne nedbrytningen her og i de andre kratrene som ligger i områder med mer fuktig jord.

4 KONKLUSJON

Det er gjennomført skytinger i Hjerkinnskyte- og øvingsfelt med røykammunisjon basert på hvitt fosfor fra 155 mm feltartilleri og 81 mm bombekaster med anslagsbrannrør og nærhetsbrannrør. Hensikten var å se på forskjeller i røykutspredning og miljøeffekter som kraterdannelse og rester av hvitt fosfor ved bruk av ulike brannrør på granatene.

Artillerigranater skutt med nærhetsbrannrør detonerer noen meter over bakken, noe som gir en bedre spredning av hvitt fosfor enn granater med anslagsbrannrør. Dette fører til at en større andel hvitt fosfor blir forbrent ved bruk av nærhetsbrannrør og en større røykutbredelse. Ved

bruk av anslagsbrannrør blir det dannet krater hvor det blir liggende en større andel hvitt fosfor i krateret som potensielt kan bli liggende i lengre tid om krateret fylles med vann. Bruk av nærhetsbrannrør på granatene fører til at det ikke dannes kratre etter detonasjonen, men kun små sår etter fragmentnedslag. Det ble derfor funnet mye lavere mengder av hvitt fosfor i nedslagsområdet til granater med nærhetsbrannrør enn granater med anslagsbrannrør.

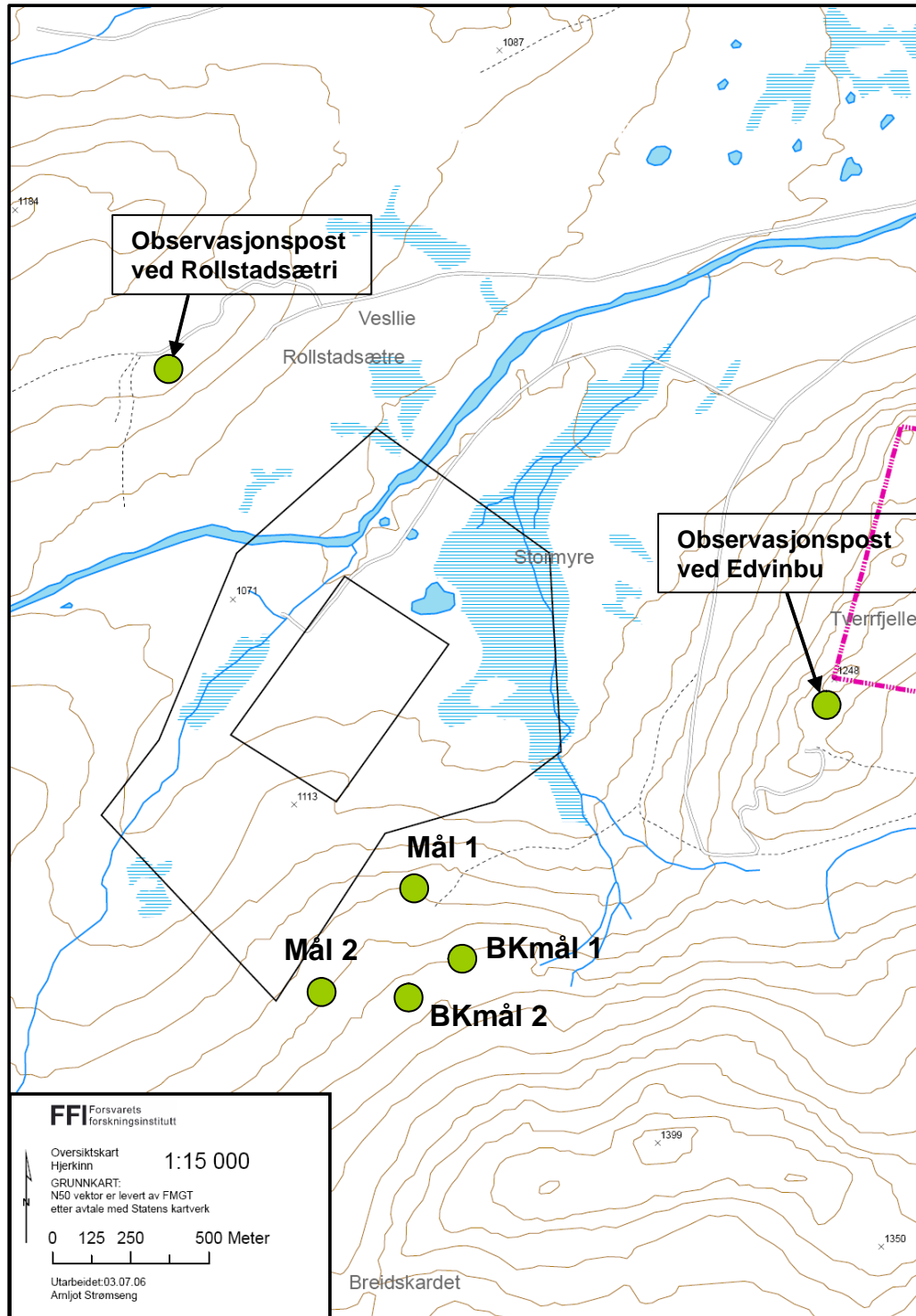
Med bombekastergranater blir det mindre sår på bakken ved bruk av nærhetsbrannrør i forhold til anslagsbrannrør. Halepartiet på granater med nærhetsbrannrør blir liggende oppå bakken i motsetning til de med anslagsbrannrør der dette presses ned i bakken, og hvitt fosfor i halepartiet kan bli liggende ureagert.

Beregning av røykskyarealer ble basert på bildeserier av røykskyer under utvikling. Både for feltartilleri og bombekaster viste det seg at den granaten med det brannrør, som etablerte det største røykskyarealet kort tid etter omsetning, også utviklet den største røykskyen over tid.

For 155 mm feltartilleri viste det seg som forventet, at ammunisjonen med nærhetsbrannrør ga det største røykskyarealet som funksjon av utspredningstiden. Denne ammunisjonen ga også minst konsentrasjon av uforbrent hvitt fosfor i bakken. For 81 mm bombekaster viste det seg at ammunisjonen med anslagsbrannrør ga den mest effektive røykskyen. Dette kan blant annet skyldes at den type nærhetsbrannrør som ble benyttet under prøvene, omsatte granaten for nær bakken slik at det ble lite spredning av hvitt fosforpartikler ved detonasjon.

APPENDIKS

A KARTUTSNITT AV PRØVEOMRÅDET, HJERKINN



Figur A.1 Kart over prøveområdet på Hjerkinn med inntegnet kameraposisjon på Rollstadsætri og Edvinbu

B MATLAB – SCRIPT FOR BEREGNING AV RØYKSKYAREAL

Et MATLAB-script som først leser inn et bilde. Deretter kan avstanden mellom to punkter beregnes ved å bruke et verktøy fra Image Processing Toolbox (roipoly). Denne versjonen beregner arealet i kvm i bildeplanet på bakgrunn av avstand til nedslagssted, granat, og brennvidden på objektivet. Den siste informasjonen hentes i EXIF-dataene i selve bildefilen.

```
clear;
filnavn = input('Gi filnavn: ');
bilde = imread(filnavn);
billedata = exifread(filnavn);
mp = billedata.PixelXDimension;
np = billedata.PixelYDimension;
brennvidde = billedata.FocalLengthIn35mmFilm;

d = input('Avstand til nedslag (m): ');
b = d*18/brennvidde;

disp('Tegn polygon i bildet. Dobbeltklikk for å avslutte!');
piksler = roipoly(bilde);
reg = find(piksler > 0);
% Finner størrelsen til valgt område i piksler
areal0 = size(reg);

f = areal0(1)/(mp*np);

areal = 4*f*b*b*(np/mp);

disp(['Røykareal i bildet ', filnavn, ' er ', num2str(areal), ' kvm']);
```


C MATLAB-SCRIPT FOR BEREGNING AV ÉN AVSTAND I ET BILDE

Et MATLAB-script som først leser inn et bilde. Deretter kan avstanden mellom to punkter beregnes ved å bruke et verktøy fra Image Processing Toolbox (roipoly). Denne versjonen beregner avstanden i meter i bildeplanet på bakgrunn av avstand til nedslagssted, granat, og brennvidden på objektivet. Den siste informasjonen hentes i EXIF-dataene i selve bildefilen.

```

clear;
filnavn = input('Gi filnavn: ');
bilde = imread(filnavn);
billedata = exifread(filnavn);
mp = billedata.PixelXDimension;
np = billedata.PixelYDimension;
brennvidde = billedata.FocalLengthIn35mmFilm;

d = input('Avstand til nedslag: ');
b = d*18/brennvidde;

disp('Dra i endepunktene på linjen for å plassere den slik du ønsker!');
disp('Trykk ENTER når justeringen er gjort!');

pause(3);

imshow(bilde);
h = imdistline;

pause();

api = iptgetapi(h);
dist = api.getDistance();

realdist = (dist/mp)*b;

disp(['Distansen er ', num2str(realdist), ' m']);

```

D MATLAB-SCRIPT FOR BEREGNING AV FLERE AVSTANDER I SAMME BILDE

Et MATLAB-script som først leser inn et bilde. Deretter kan avstanden mellom to punkter beregnes ved å bruke et verktøy fra Image Processing Toolbox (roipoly). Denne versjonen beregner avstanden i meter i bildeplanet på bakgrunn av avstand til nedslagssted, granat, og brennvidden på objektivet. Den siste informasjonen hentes i EXIF-dataene i selve bildefilen. Når en avstand er beregnet kan om ønskelig, flere avstander i samme bildet berregnes.

```
clear;
filnavn = input('Gi filnavn: ');
bilde = imread(filnavn);
bildedata = exifread(filnavn);
mp = bildedata.PixelXDimension;
np = bildedata.PixelYDimension;
brennvidde = bildedata.FocalLengthIn35mmFilm;

d = input('Avstand til nedslag: ');
b = d*18/brennvidde;

disp('Dra i endepunktene på linjen for å plassere den slik du ønsker!');
disp('Trykk ENTER når justeringen er gjort!');

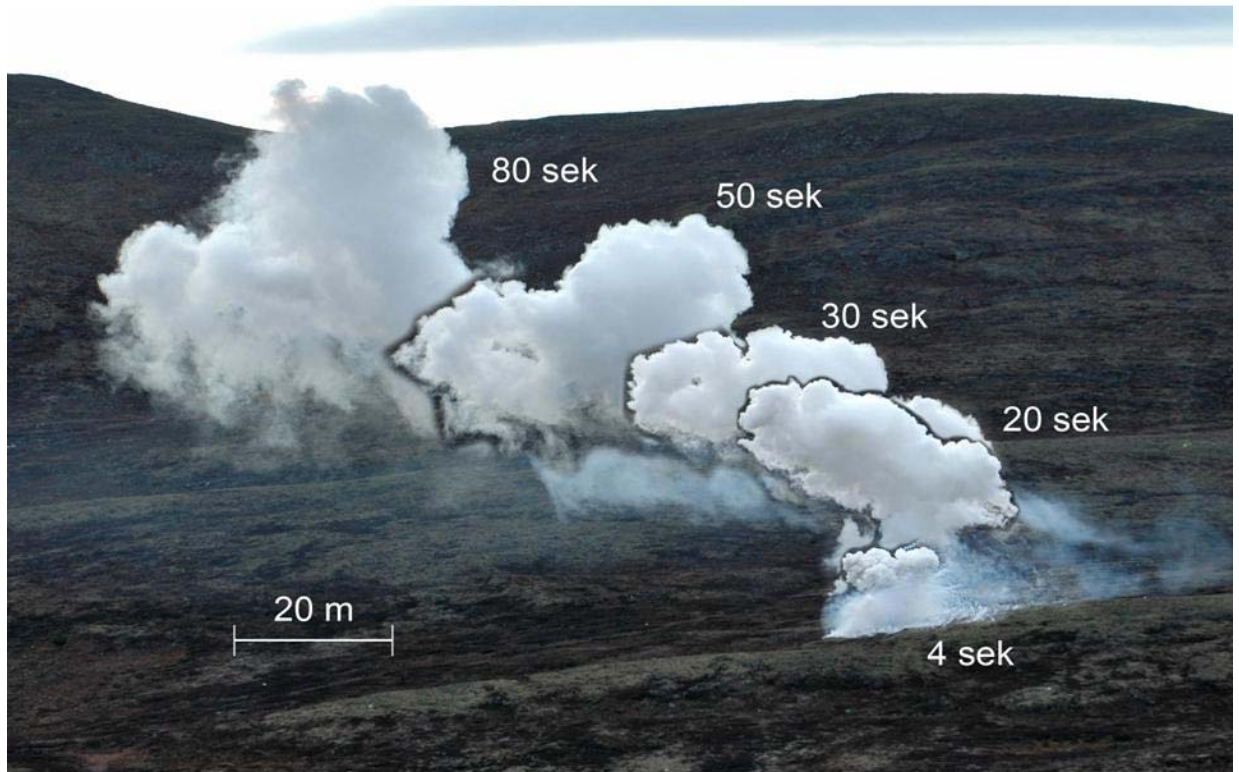
pause(3);

imshow(bilde);

h = imdistline;

api = iptgetapi(h);

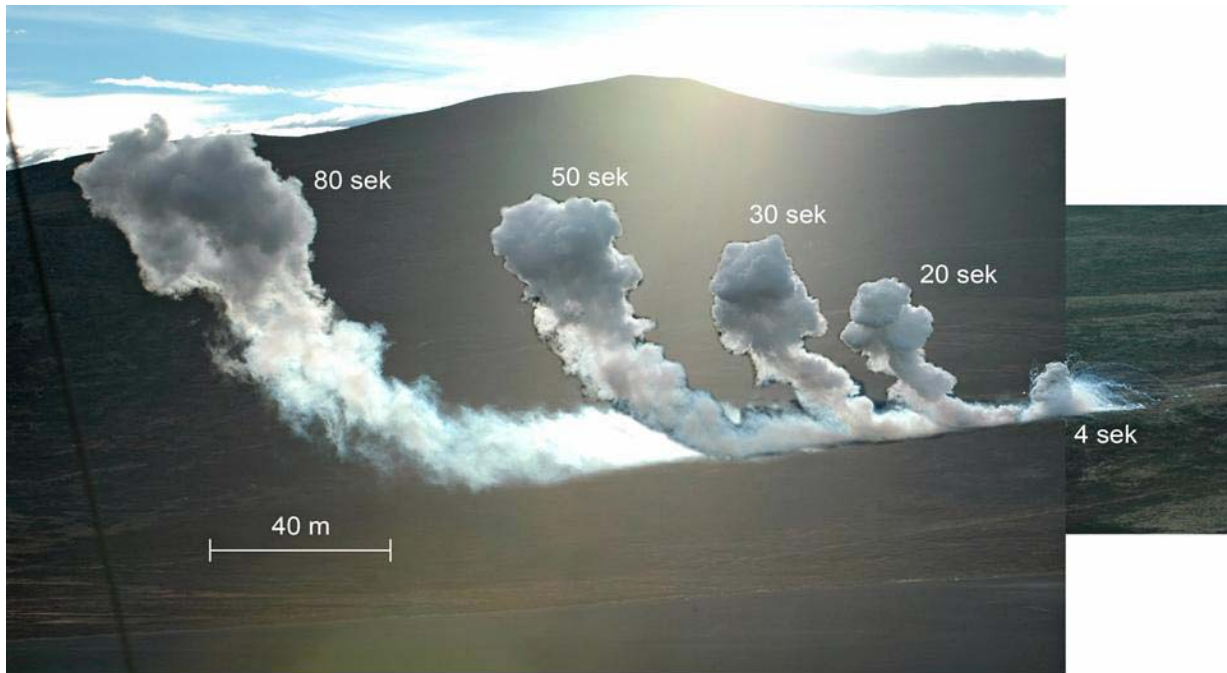
svar = 'y';
while (svar == 'y')
    pause();
    dist = api.getDistance();
    realdist = (dist/mp)*b;
    disp(['Distansen er ', num2str(realdist), ' m']);
    svar = input('Ny linje? (y/n)','s');
end
```

E BILDER RØYKUTVIKLING 155 MM FA**E.1 Anslagsbrannrør**

Figur E.1 Røykutvikling fra artillerigranat nr 2 med anslagsbrannrør

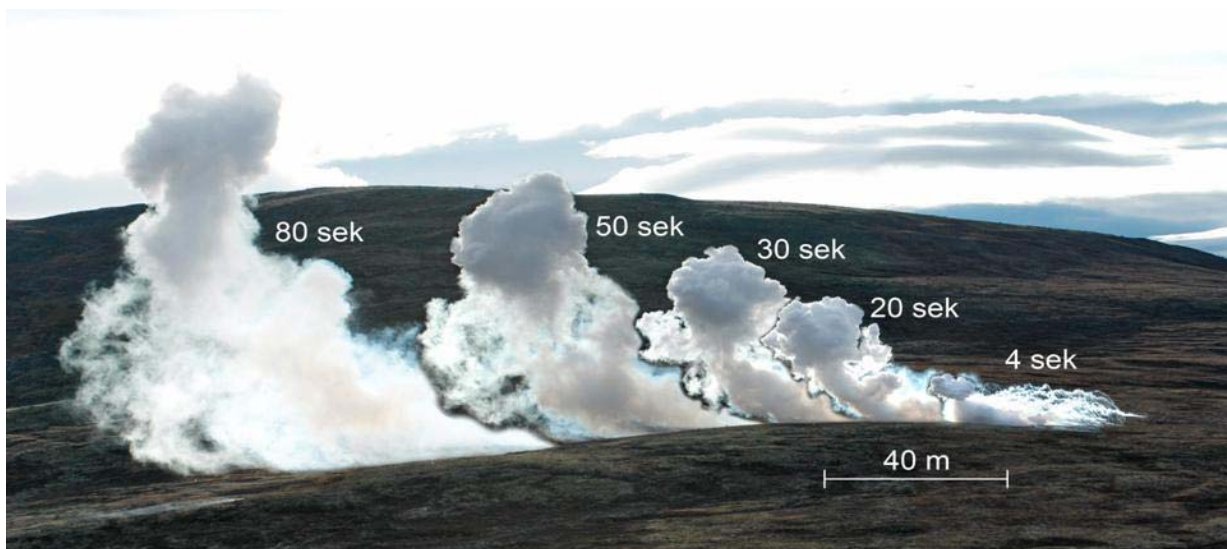


Figur E.2 Røykutvikling fra artillerigranat nr 3 med anslagsbrannrør

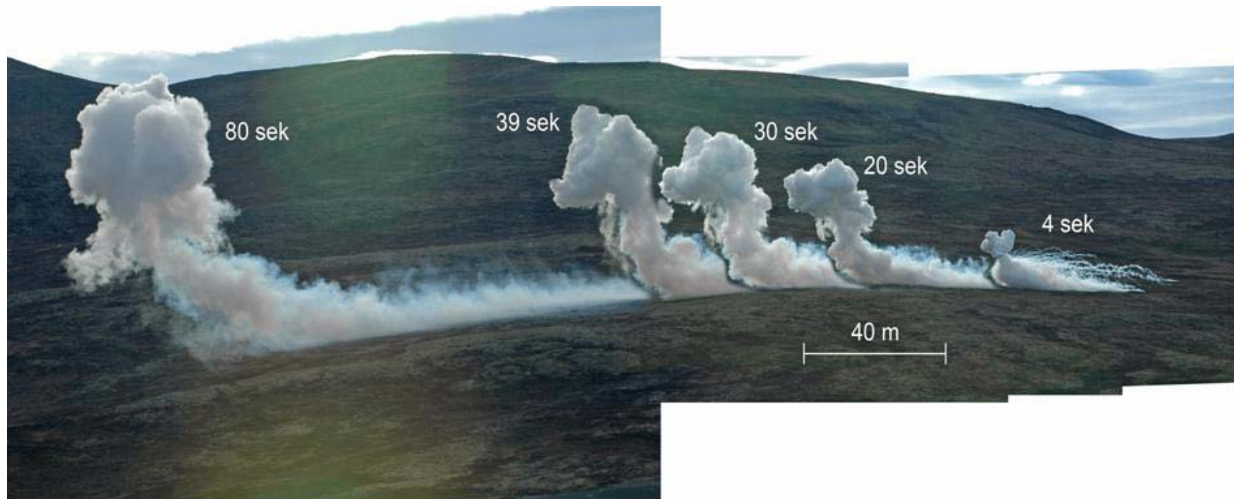


Figur E.3 Røykutvikling fra artillerigranat nr 4 med anslagsbrannrør

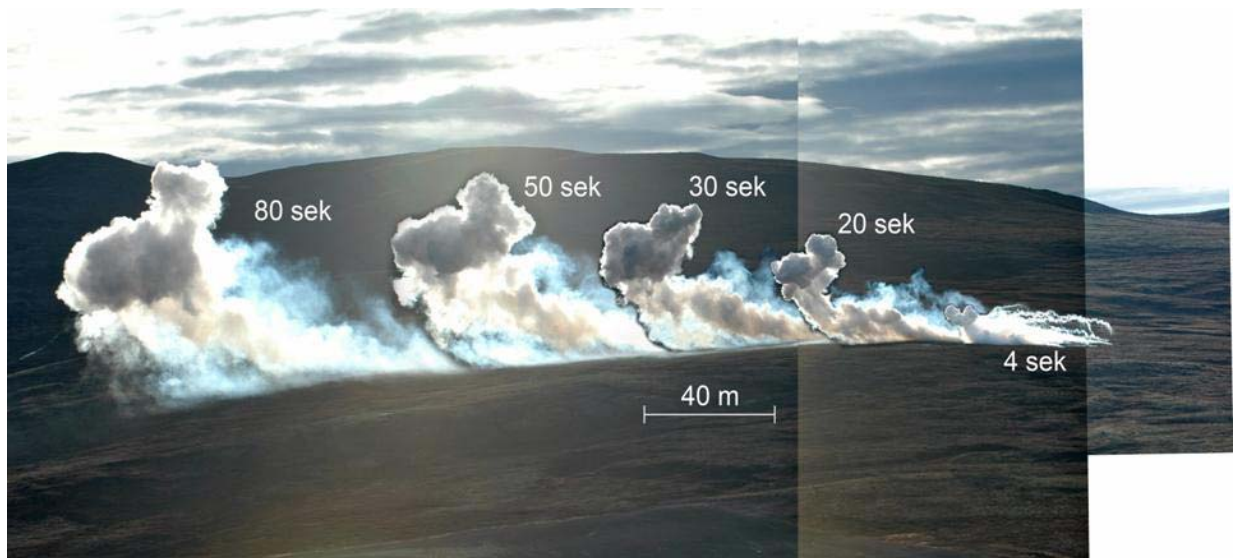
E.2 Nærhetsbrannrør



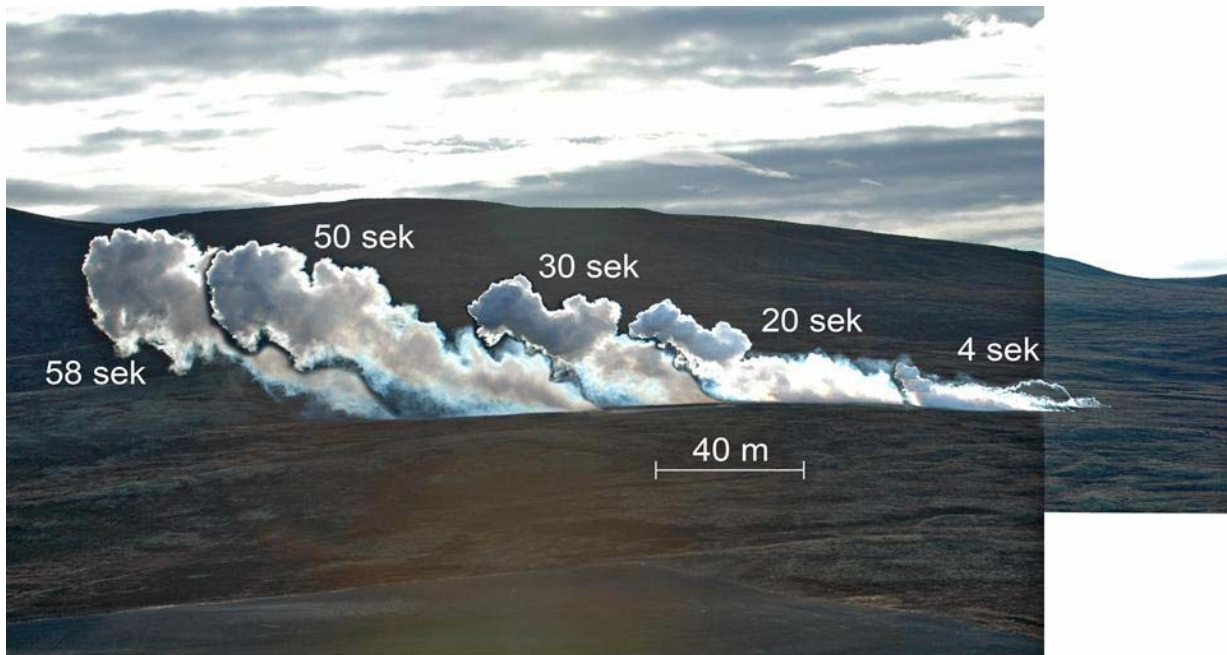
Figur E.4 Røykutvikling fra artillerigranat nr 1 med nærhetsbrannrør



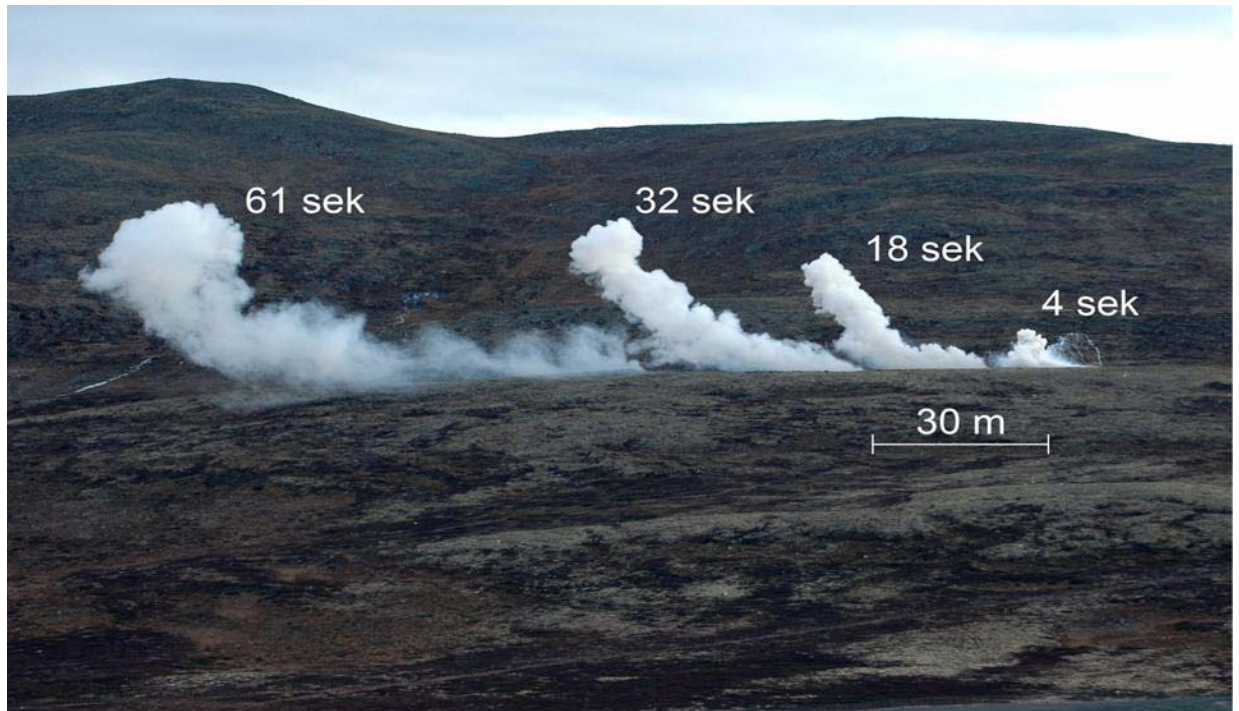
Figur E.5 Røykutvikling fra artillerigranat nr 2 med nærhetsbrannrør



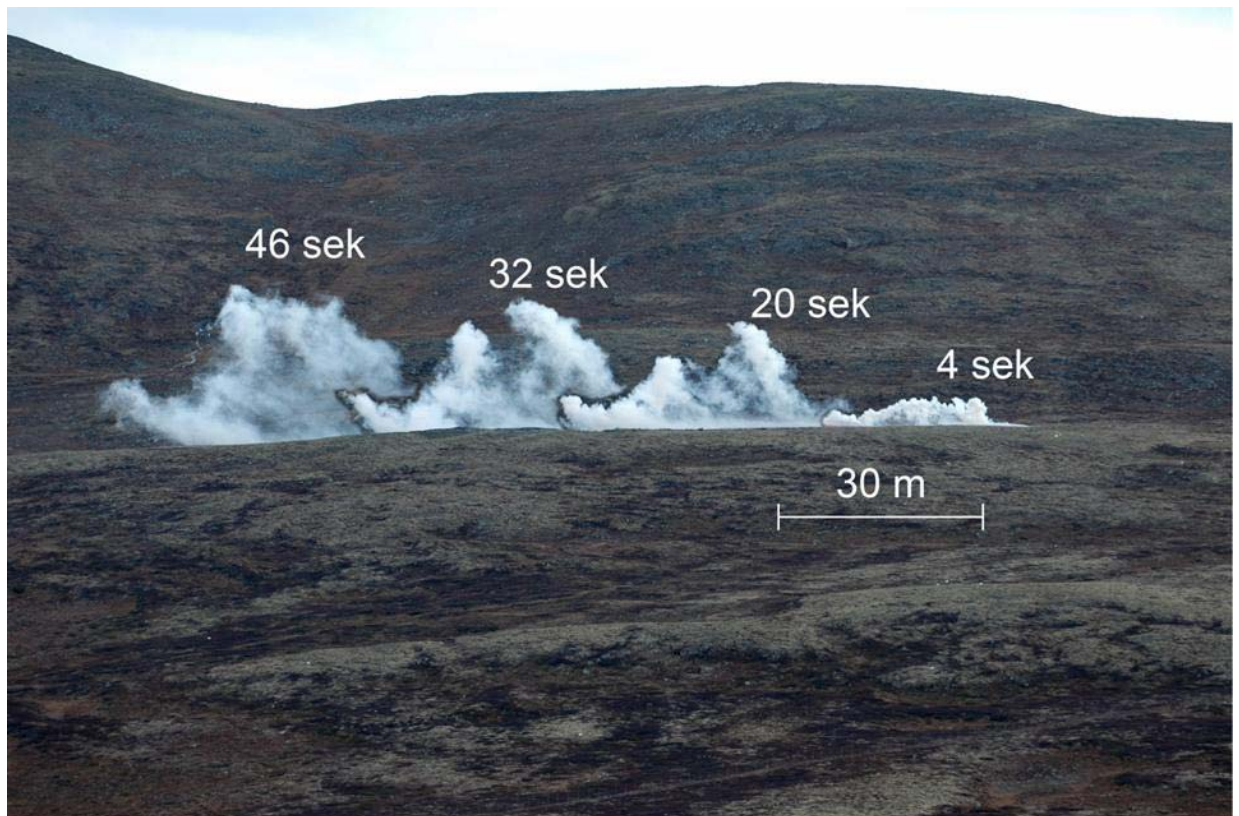
Figur E.6 Røykutvikling fra artillerigranat nr 3 med nærhetsbrannrør



Figur E.7 Røykutvikling fra artillerigranat nr 4 med nærhetsbrannrør

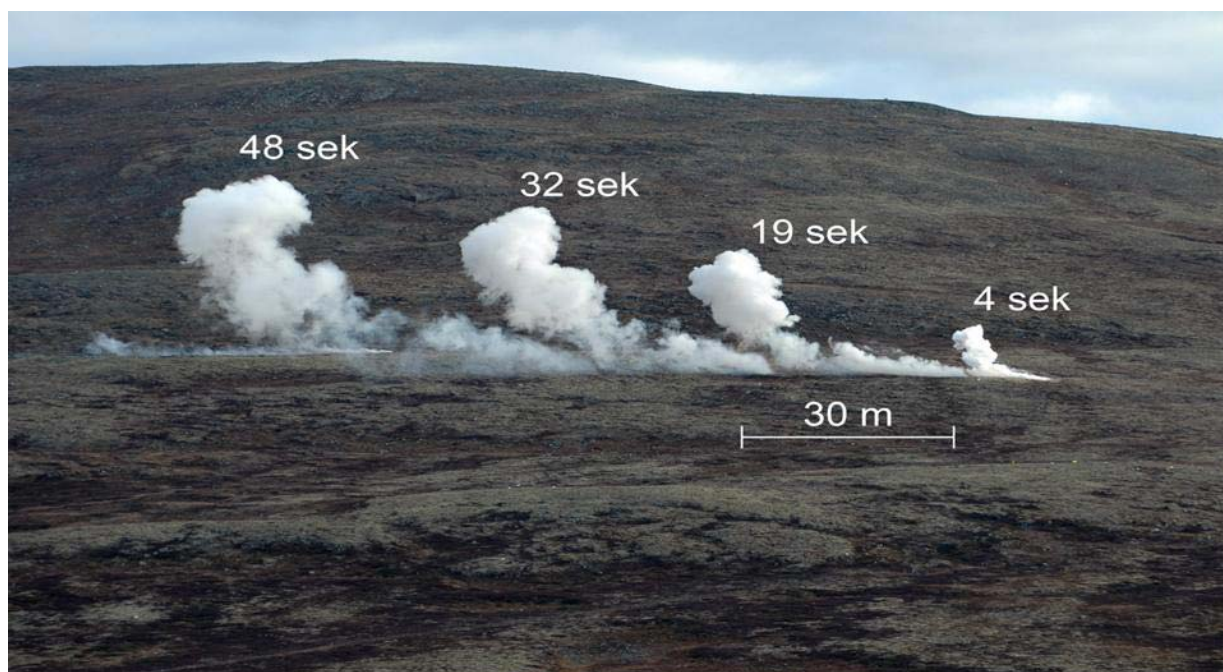
F BILDER RØYKUTVIKLING 81 MM BK**F.1 Anslagsbrannrør**

Figur F.1 Røykutvikling fra BK-granat nr 2 med anslagsbrannrør

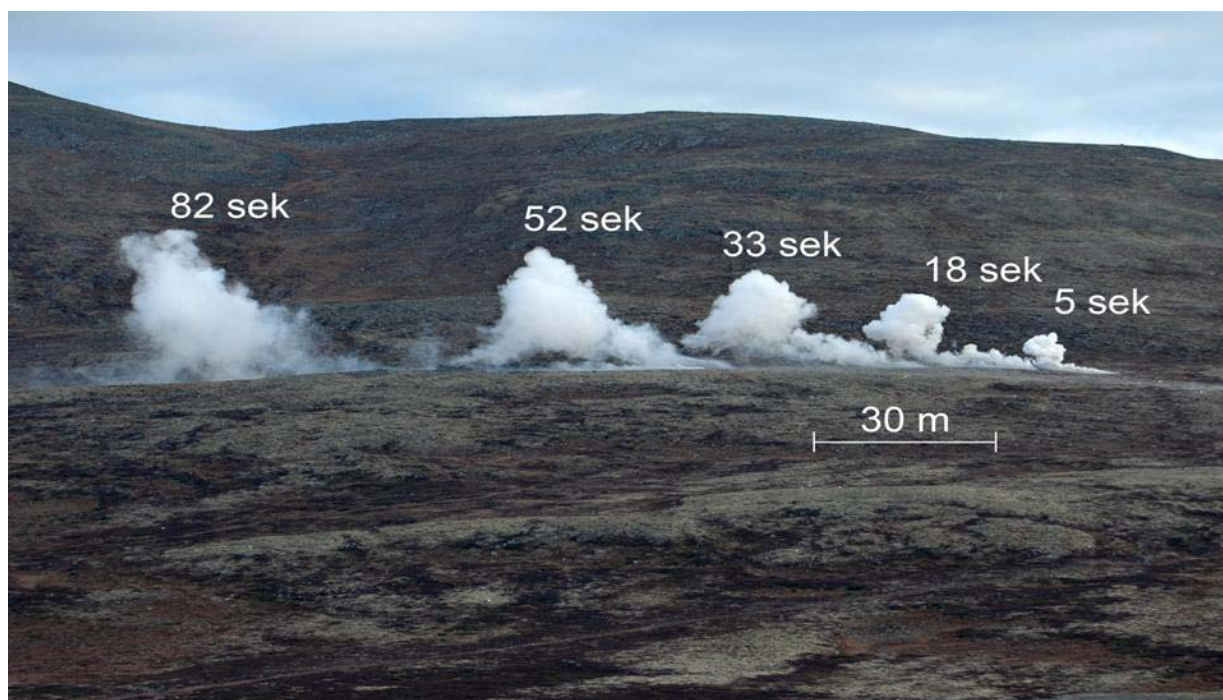


Figur F.2 Røykutvikling fra BK-granat nr 3 med anslagsbrannrør

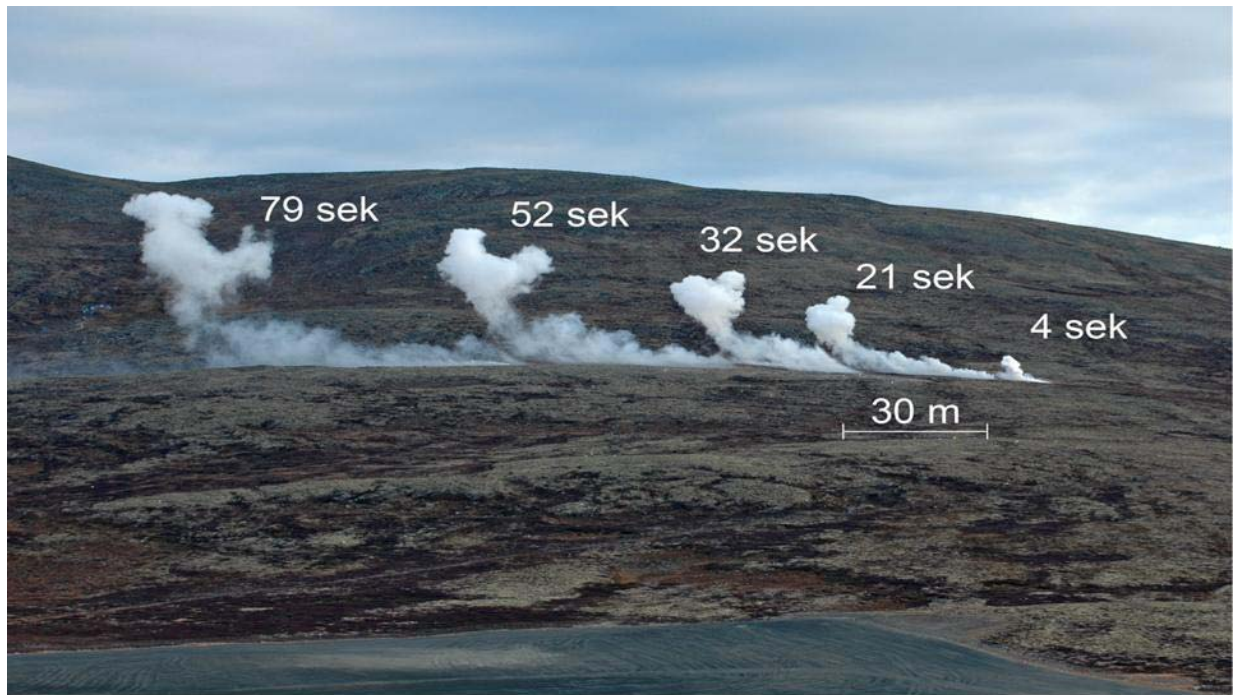
F.2 Nærhetsbrannrør



Figur F.3 Røykutvikling fra BK-granat nr 1 med nærhetsbrannrør



Figur F.4 Røykutvikling fra BK-granat nr 2 med nærhetsbrannrør



Figur F.5 Røykutvikling fra BK-granat nr 3 med nærhetsbrannrør

Litteratur

- (1) Jane's Ammunition Handbook (2004).
- (2) Tørnes, J A (1988): Bestemmelse av hvitt fosfor i prøver fra Forsvarets skytefelt på Dovre, FFI/RAPPORT-6909
- (3) United States Environmental Protection Agency (1996): EPA Method 7580. Determination of white phosphorus (P4) concentration by solvent extraction and gas chromatography. <http://www.epa.gov/>.
- (4) Søbye E, Johnsen A, Strømseng A E (2003): Kartlegging av hvitt fosfor forurensning i Hjerkinnskytefelt, FFI/RAPPORT-2003/01224
- (5) Søbye E, Johnsen A, Longva K S, Strømseng A E, Ljønes M, Oddan A (2004): Spredning av hvitt fosfor ved detonasjon av røykgranater med hvitt fosfor. Sluttrapport, FFI/RAPPORT-2004/00177
- (6) HQ Dep of Army, TANK PLATOON (1996): Field Manual (FM) 17-15, App F, Washington DC.
- (7) Strømseng A E, Johnsen A, Voie Ø A, Longva K S (2006): Risikovurdering av Forsvarets bruk av hvitt fosfor i Troms, FFI/RAPPORT-2006/02989
- (8) Upubliserte data fra målinger av hvitt fosfor i kratre på Hjerkinnskytefelt