

STF66 A00084

Gradering: Åpen

R
A
P
P
O
R
T

Selvantemming i høy og halm

SINTEF Kjemi
August 2000



SINTEF
Kjemi

**SINTEF****SINTEF**Postadresse: Postboks 124 Blindern,
0314 Oslo

Besøksadresse: Forskningsveien 1

Telefon: 22 06 73 00

Telefax: 22 06 73 50

Telex: 71 536 SI N

Foretaksnr.: 948007029

SINTEF RAPPORT

TITTEL

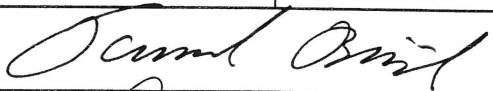
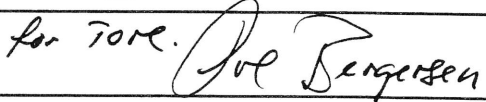
SELVANTENNING I HØY OG HALM

FORFATTER(E)

Tormod Briseid og Gudmunn Eidså

OPPDRAGSGIVER(E)

Landbrukets Brannvernkomite

RAPPORTNR	GRADERING	OPPDRAGSGIVERS REF.	
STF66 A00084	Åpen	Øyvind Engedahl	
GRADERING 1. SIDE	ISBN	PROSJEKTNR.	ANTALL SIDER OG BILAG
Åpen	82-14-01097-7	66399207	34
ELEKTRONISK ARKIVKODE	FAGLIG ANSVARLIG		
RAPPORT.DOC	Tormod Briseid 		
ARKIVKODE	DATO	ANSVARLIG SIGNATUR	
	2000-08-28	for Tore. 	
ANSVARLIG SIGNATUR			
Tore Aunaas			
SAMMENDRAG			
<p>Branner i driftsbygninger i landbruket er et problem som medfører dyretragedier og har store økonomiske konsekvenser. At selvoppvarming i vått plantemateriale kan forekomme og at dette tidvis kan lede til spontan selvantennelse, er kjent. Fenomenet er imidlertid lite studert, og betingelsene som danner grunnlaget for slike branner er ikke tilstrekkelig godt kjent.</p> <p>På denne bakgrunn er hovedmålet med prosjektet: <i>Å senke antallet branner i låver og driftsbygninger i landbruket, som er forårsaket av spontan selvantennelse i høy og halm.</i> Målet med dette innledende prosjektet er: <i>Å utføre et innledende studie i laboratorieskala for å finne en mulig sammenheng mellom anaerobe miljøer, det vil si miljøer hvor oksygenet er brukt opp, og selvantennning.</i></p> <p>Resultatene viser at det eksperimentelle oppsette er godt egnet til å studere selvoppvarming i høy. Det konkluderes med at kjemisk oppvarming og selvantennning krever et tørt miljø, mens den biologiske prosessen som varmer høyet opp til 70 - 78°C krever et fuktig miljø. Dette kan skje i adskilte områder i høy ute, men det krever at det også taes hensyn til dette i fremtidige eksperimenter. I tillegg til fuktforhold og oksygenbetingelser, anaerobe nisjer samt tilstedeværelse av mikroorganismer, diskuteres det om innblanding av andre planter med oljeholdige frø kan ha betydning for selvantenningsprosessen. Det presenteres en arbeidshypotese om hvordan man tenker seg at selvantennning kan oppstå. Det er i denne sammenheng viktig å se på det sammensatte kjemiske og biologiske miljøet man kan få i større ansamlinger av høy og halm. Avslutningsvis skisseres det hvordan man bør gå fram i det videre arbeidet for å få innsikt i denne typen branner og på sikt kunne hindre at denne typen branner skjer.</p>			
STIKKORD	NORSK	ENGELSK	
GRUPPE 1	Mikrobiologi	Microbiology	
GRUPPE 2	Fórteknologi	Feed technology	
EGENVALGTE	Selvantennning	Spontaneous ignition	
	Høy og halm	Hay and straw	
	Landbruk	Agriculture	

INNHALDSFORTEGNELSE

INNHALDSFORTEGNELSE	1
SAMMENDRAG	2
1. BAKGRUNN	6
PROBLEMSTILLINGEN	6
HISTORIKK	6
BIOLOGISK FORÅRSAKET SELVANTENNELSE, FUKTIGHETSANBEFALINGER OG TEMPERATURFORHOLD	7
MÅL	9
METODER	11
FORSØKSOPPSETT - PRINSIPP	11
INKUBATORSKAP OG TEMPERATURKONTROLL	11
BEHOLDERE FOR PRØVEMATERIALE	12
OKSYGENMÅLINGER	13
VEKTMÅLINGER	13
FORSØKSMATERIALE	13
SIKRINGSTILTAK	14
RESULTATER OG DISKUSJON	15
TERMOSFORSØK 1	15
TERMOSFORSØK 2	17
POSEFORSØK 1	18
POSEFORSØK 2	21
POSEFORSØK 3	22
POSEFORSØK 4	23
KONKLUSJONER OG VURDERINGER	25
TEMPERATURØKNING TIL OVER 75°C:	25
SAMMENSATTE MILJØER:	25
EN ARBEIDSHYPOTESE	27
VIDERE ARBEID	29
REFERANSER	32

Sammendrag

Innledning

Branner i driftsbygninger i landbruket er et problem som medfører dyretragedier og har store økonomiske konsekvenser. Så mange som 7 av 20 slike undersøkte branner i 1998 hadde ukjent årsak, og 1 hadde selvantennning i fôr som antatt brannårsak. At selvoppvarming i vått plantemateriale kan forekomme og at dette tidvis kan lede til spontan selvantennelse, er kjent. Fenomenet er imidlertid lite studert, og betingelsene som danner grunnlaget for slike branner er ikke tilstrekkelig godt kjent.

Mål

På denne bakgrunn er hovedmålet med prosjektet:

Å senke antallet branner i låver og driftsbygninger i landbruket, som er forårsaket av spontan selvantennelse i høy og halm.

Målet med dette prosjektet, som er et innledende prosjekt, er:

Å utføre et innledende studie i laboratorieskala for å finne en mulig sammenheng mellom anaerobe miljøer, det vil si miljøer hvor oksygenet er brukt opp, og selvantennning.

Bakgrunn

Fra litteraturen kjenner vi til noen få undersøkelser som har ført til at høy spontant øker temperaturen til over 80°C i laboratorieforsøk. Dette har imidlertid krevet at høyet er blitt tørket på kunstig vis i kortere eller lengre perioder. Erfaringene fra observasjoner i felt er mere omfattende, men vi kjenner bare til ett eksempel der en brann har oppstått, og dette skjedde ikke under kontrollerte betingelser.

Vi vet at selve tørkingen av høyet før det samles sammen er viktig. Ved fuktigheter over 60% er plantenes stomata (spalteåpninger) åpne og tørkingen foregår ekstra raskt i tørt varmt vær. Det er vanskeligere å senke fuktigheten til under 30%. Det sies at høy er mikrobiologisk tilnærmet helt stabilt når fuktigheten er under 12% og i likevekt med en relativ luftfuktighet på 65%, noe avhengig av temperaturforhold.

Store hauger, baller eller større stakker bør ha en fuktighet som ikke overstiger 15 - 18%. Mindre firkant-pakker med stor kjølede overflate kan ha en noe høyere fuktighet (20-25%). Dersom fuktigheten er enda høyere (20-30%) kan det være aktuelt å benytte preservativer. Det er viktig å unngå tilførsel av fukt fra taklekkasjer, gulvfuktighet, eller medbragt i fuktige høyklumper.

Det sies at temperaturer opp mot 55 °C ikke er unormalt i høy. Vi kjenner ikke til om dette er systematisk undersøkt i Norge, men det planlegges en viss kartlegging i Sverige med det første. Ved temperaturer på 65 °C vil temperaturen kunne ha en tendens til å fortsette å øke. Man må

sikre kjøling og sjekke temperaturen ofte. Man må vær forsiktig dersom kjøling innebærer å flytte/vende på haugen eller luften. Dette kan gi en brannutvikling dersom det finnes andre soner i haugen med enda høyere temperaturer.

Ved 80-90 °C er selvantennning under utvikling. De kjemiske prosessene har da overtatt for de biologiske prosessene som stopper opp i området 70 - 78 °C. Det vil kunne utvikle seg brann umiddelbart dersom man lufter høyet eller en brann kan oppstå over tid dersom man ikke foretar seg noe. Brannvesenet må kontaktes.

Resultater

SINTEF har utviklet et forsøksystem hvor forsøksmateriale plasseres i en termos eller en forsøkspose plassert i et kammer/inkubasjonsskap og hvor temperaturen i inkubasjonsskapet reguleres som funksjon av temperaturen i prøven. Ved alltid å holde temperaturen i omgivelsene noe lavere enn temperaturen i prøven, vil en eventuell temperaturøkning skyldes en eksoterm reaksjon i prøven, enten biologisk aktivitet eller kjemiske eksotermiske reaksjoner, og at energien som utvikles er større enn kjølingen av prøven. Prøven vil kjøles, både ved direkte avkjøling av overflaten og ved oppvarming av eventuell tilført luft. I en fuktig prøve som luftes vil vanligvis den største kjøleeffekten være fordampningen av vann.

Resultatene viser at prøver av høy oppnådde temperaturer mellom 70 og 78°C, både i termosforsøk i 1 liter skala, og i plastposeforsøk i 10 liter skala. Temperaturøkningen krevde god tilgang på luft (oksygen). Egnede fuktighetsforhold og tilsetning av mikroorganismer ga en svært rask temperaturøkning.

En temperaturøkning var avhengig av tilstrekkelig tilførsel av oksygen for å oppnå aerobe betingelser.

Resultatene tyder også på at den biologisk tilgjengelige energien brukes opp relativt raskt når fukt og oksygenforholdene er gode og mikroorganismene er tilstede.

For å få en rask temperaturheving ble det tilført mikroorganismer til høyet. Om dette var nødvendig ble ikke systematisk undersøkt. Likeledes ble det tilført fuktighet, og i enkelte tilfelle næringsalter og annen organisk karbonkilde.

En viktig observasjon var at vannet hadde en tendens til å vandre i større poseforsøk. Vannet tørker bort i de varme sonene og kondenserer ut i kjøligere områder.

Resultatene av poseforsøkene viser at ved temperaturer under 70°C er mikroorganismene svært aktive, og oksygenet brukes fort opp. Det danner grunnlaget for anaerobe soner med dannelse av ustabile kjemiske stoffer som lett oksiderer ved tilgang på oksygen. Ved temperaturer over 70°C synker den biologiske aktiviteten, og oksygenet viste seg å kunne trenge lengre inn i høyet.

Konklusjoner og vurderinger

Resultatene viser at det eksperimentelle oppsette er godt egnet til å studere selvoppvarming i høy, både ved bruk av termosforsøk og poseforsøk.

Det konkluderes også med at kjemisk oppvarming og selvantennning krever et tørt miljø, mens den biologiske prosessen som varmer høyet opp til 70 - 78°C krever et fuktig miljø. Dette kan skje i adskilte områder i høy ute, men det krever at det også taes hensyn til dette i fremtidige eksperimenter. Dette kan gjøres i sammenkoblede termosforsøk, eller i større poseforsøk. Termosforsøk gir imidlertid større mulighet til godt kontrollerbare betingelser.

Den biologisk tilgjengelige energien i høyet brukes for fort opp i et lukket område, til å oppnå betingelser for kjemisk selvoppvarming. Dette kan innebære at de biologisk aktive sonene flytter seg i høyet, avhengig av energi, fukt og oksygenbetingelsene. Dette må det også taes hensyn til i laboratorieforsøkene.

I tillegg til fuktforhold og oksygenbetingelser, samt tilstedeværelse av mikroorganismer, diskuteres det om innblanding av andre planter i høyet kan ha betydning for selvantenningsprosessen. Frøplanter kan ha oljerike frø som destrueres ved temperaturer over 60 - 78°C og oljeforbindelsene kan oksideres. Dette kan være med å forklare eventuelle regionale variasjoner, samt betydningen av tidspunktet for innsamlingen av høy.

En Arbeidshypotese

I rapporten er skissert en hypotese om hvordan vi tenker oss at utviklingen av en selvantennning kan foregå:

1. Høy med en litt for stor fuktighet legges sammen. Fuktigheten og tilstedeværelsen av mikroorganismer danner grunnlaget for en temperaturøkning opp til 70 - 78°C i hele høyet.
2. Oksygenet trenger inn fra overflaten, og kjerneområdet blir fritt for oksygen, mens varmesonen er noe mer perifer. Kjernen varmes imidlertid opp av varmesonen.
3. Den biologisk tilgjengelige energien i varmesonen brukes opp og sonen flytter seg innover mens oksygenet stadig trenger dypere innover i høyet.
4. Den varme sonen i kjernen tørker ut ved at vanndamp diffunderer utover og kondenserer ut nærmere overflaten. En viss uttørking forekommer også helt på overflaten.
5. Dersom tørr luft utenfra med oksygen trenger inn gjennom den fuktige biologisk aktive varmesonen, enten på grunn av plutselige fysiske forstyrrelser, eller på grunn av vind eller trekk (pipe-effekt i høyet eller hull i underlaget) vil det settes igang en kjemisk oksidasjon i kjernen, med påfølgende forkulling. En brann vil først kunne utvikle seg dersom trekken fører oksygen inn over en viss tid, slik at den kjemiske oksidasjonen når gjennom en kanal gjennom den biologisk aktive fuktsonen og ut i tørt overflatehøy.

Det er viktig å merke seg at tidligere nevnte faktorer som anaerobe ustabile stoffer og høyets sammensetning vil være av sentral betydning.

Rapporten omhandler avslutningsvis hvilke arbeidsoppgaver som vi anser som viktige i det videre arbeidet. Dette er knyttet opp mot delmålene:

- 1. Å finne fram til de betingelsene som danner det nødvendige grunnlaget for selvantennelse i høy og halm.*
- 2. Å kartlegge typiske betingelser ved lagring av høy og halm idag, for å finne fram til hvilke faktorer som ligger til rette for at spontan selvantennelse kan skje, og hvilke faktorer som nesten alltid forhindrer at det faktisk skjer.*
- 3. Å utarbeide en egnet testmetode for bedre å kunne forutsi faren for selvantennelse i høy og halm.*
- 4. Å vurdere spesielle brannsikringstiltak mot denne typen branner.*

Det er satt opp en del mer detaljerte punkter for hvert delmål. Det presiseres at det er sterkt ønskelig om en kontinuitet i arbeidet er mulig, slik at allerede årets sesong kan benyttes i disse studiene.

1. Bakgrunn

Problemstillingen

Branner i driftsbygninger i landbruket er et problem som medfører dyretragedier og har store økonomiske konsekvenser. Undersøkelsesgruppen for branner i driftsbygninger, bestående av representanter fra Statens bygningstekniske etat, Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern og Gjensidige, undersøkte i 1998 20 branner der dyr var involvert. Totalt omkom det 369 sauer, 1180 griser, 206 storfe 1728 fjørfe og 27 andre dyr i disse brannene. Om lag tilsvarende tall er å finne for 1997 og tallene må regnes som representative for omkomne dyr per år i slike branner i Norge. Tallene for fjørfe vil kunne variere relativt mye fra år til år. Av de 20 undersøkte brannene i 1998 var antatt brannårsak ukjent i 7 av tilfellene. I en av brannene var antatt brannårsak selvantennelse i fôr (Korsaksel, Sandberg og Rød, 1999). Det er verdt å merke seg at ved flere av brannene med ukjent årsak, var antatt arnested på låven, gjerne i 2. etasje.

Historikk

Selvoppvarming i vått plantemateriale, som tidvis leder til spontan selvantennelse, er ikke uvanlig (Currie og Festenstein, 1971, Miao og Yoshizaki, 1994). Opp til om lag 40°C kan plantenes egen respirasjon føre til en oppvarming, dersom fuktigheten er høy nok. Videre oppvarming til om lag 70 - 78°C forårsaket av mikroorganismer er en godt kjent prosess, blant annet fra kompostering. Ved høyere temperaturer overtar eksoterme kjemiske oksidasjoner, selv om dette ikke nødvendigvis fører til selvantennning. Allerede i 1929 rapporterte Truninger om temperaturer på 86°C i en eksperimentell høystakk. En høystakk med et vanninnhold på 40% nådde en temperatur på 50°C i løpet av 3 dager og hele 80°C på 8 dager og forble over 80°C i over 2 måneder. Hoffman (1935), Hoffman og Bradshaw (1937) og Roethe (1937) rapporterte om temperaturer på 88°C. Den eneste eksperimentelle høystakken som har tatt fyr, er rapportert av Musselman (1935), men dette skjedde uten at dette var hensikten. I følge Firth og Stuckey (1945) som gjorde en omfattende studie av branner i høystakker, var stabile temperaturer på 80 - 90°C de høyeste som var registrert og at de fleste brannene skjedde 5 til 10 uker etter at høystakkene var lagt opp.

Milner og Geddes (1946) var de første som registrerte temperaturer over 70°C i laboratorieforsøk med vått plantemateriale, mens fuktige soyabønner nådde temperaturer på hele 101 °C i kontrollerte temperaturomgivelser ved lufting med luft ved en viss relativ fuktighet (Working 1942 og Ramstad og Geddes, 1942). Fuktig hvetekorn nådde temperaturer på 94°C ved tilsvarende behandling (Milner et al., 1947). I 1963 utførte Rothbaum forsøk med høy, hvor han oppnådde temperaturer over 70°C når det ble luftet med luft med en relativ fuktighet mellom 95 og 97%. Ved lufting med tørrere luft som tørket ut høyet, nådde Rothbaum (1963) temperaturer over 100°C etter 23 til 40 dager. Spontan selvoppvarming opp til 80°C er også rapportert av Nelson (1968), Kawakami (1982) og Tokari (1986). Koegel og Bruhn (1971) har studert spontan selvantennning i silo. Mye russisk litteratur dreier seg om spontan selvoppvarming og selvantennning i torv, og denne litteraturen er satt opp i referanselisten.

Currie og Festenstein (1971) rapporterte om 2 laboratorieforsøk med høy som selvoppvarmet til over 100°C etter 39 og 43 dager. I et forsøk ble fuktet høy i en 1 L termos luftet med en hastighet på 10 mL per minutt i 6 døgn intil 65°C var nådd. Temperaturen i omgivelsene ble hele tiden kontrollert, men holdt lavere enn i prøven. Luftingen ble deretter senket til 5 mL per

minutt. Temperaturen økte til 75°C på 7 dager og stabiliserte seg mellom 75 og 80°C i 33 dager mens prøven hele tiden tørket videre ut før den økte til 90°C på 3 dager og deretter opp til hele 165°C på 3 dager. Det kommenteres at temperaturkontrollen i perioder bare responderte på temperaturøkninger, ikke temperatursenkninger i denne perioden. I et annet forsøk utført på tilsvarende vis, men med en forbedret temperaturkontroll og ved lufting kun ved diffusjon i den siste delen av forsøket, økte temperaturen til 192°C etter 43 dager. Differanstemperaturen mellom prøven og omgivelsene er dessverre ikke oppgitt for disse forsøkene.

Miao og Yoshizaki (1994) har studert spontan selvoppvarming av ovnstørket høy (tørket ved 105°C til en tørrhet på 2 vektprosent) og deretter regulert til 1,3%, 3,7%, 7,0% og 12,9% fra 70°C opp mot selvantenningspunktet ved å la forfuktet luft passere høyet. Jo tørrere høy, jo raskere oppvarming. Også større fuktighet på luften som ble tilført førte til raskere temperaturheving. Dette kan delvis skyldes kondensasjonsvarme som frigjøres (vår kommentar). Selv om noe CO₂ og CO ble dannet allerede ved 70°C, økte denne produksjonen sterkt med økende temperatur og nådde en produksjon på henholdsvis 4,7g og 0,26g per kg høy per time ved 200°C. Et praktisk problem knyttet til disse resultatene er at så tørt høy ikke vil skape mikrobiologisk aktivitet som er en forutsetning for temperaturer på 65 - 78°C. Dersom disse tørre forholdene skal kunne føre til selvantennning, må disse forhold være adskilt, enten i tid eller sted.

Det finnes en standard metode (ASTM, E771-90, Reapproved 1996) til å bestemme spontane selvoppvarming i materialer. Metoden bestemmer den laveste temperaturen som fører til en spontan temperaturheving i et materiale, fast materiale eller en væske. Metoden er tilpasset svært små prøvevolumer og er ikke egnet for inhomogent og grovt materiale som høy og halm, men kan kanskje benyttes til prøver av fôr. Spontan temperaturheving refererer til et langt tidligere stadium i reaksjonen enn den som er assosiert med selve selvantenningen av materiale. Det er viktig å skille disse to begrepene fra hverandre selv om spontan temperaturheving vil kunne føre til selvantennning. De laveste tenntemperaturene i høy er rapportert fra 200°C (Miao og Yoshizaki, 1994) til 250 - 460°C (Jacobsen et al., 1961; Kawakami, 1980).

Biologisk forårsaket selvantennelse, fuktighetsanbefalinger og temperaturforhold

På oppdrag fra Gjensidige utførte SINTEF en litteraturundersøkelse i 1998/1999 om selvantennning i høy, halm og fôr. Rapporten sammenfatter i korte trekk informasjon om biologisk betinget selvantennelse, fuktighetsanbefalinger og temperaturforhold:

Biologisk forårsaket selvantennelse

Biologisk aktivitet danner alltid varme. Samtidig omdannes materiale og det dannes kjemiske restprodukter. De kjemiske restproduktene er enten stabile, noe som er vanligst etter aerobe prosesser som i hovedsak danner karbondioksid og vann, eller ustabile som etter anaerobe biologiske prosesser (for eksempel metan, hydrogen, alkoholer og en lang rekke mindre kjente mellomprodukter). Den maksimale temperaturen for denne typen biologiske prosesser er ca. 70 - 78°C.

Reaksjonshastigheten til kjemiske reaksjoner øker derimot videre med temperaturen. Eksoterme kjemiske reaksjoner som frigjør varme vil derfor kunne øke temperaturen ytterligere slik at reaksjonen blir raskere og raskere.

Kjøling skjer ved fordampning og direkte ved overflatekontakt (fuktforhold er viktig både med hensyn til varmeledningsevne og fordampning). Eventuell varmetilførsel og omgivelsestemperaturen er også av betydning.

Fysiske forhold av betydning for tilførsel av reaktanter er viktig, f.eks. tilførsel av oksygen/luft på grunn av vind, bevegelse, stikking inn i hauger eller lignende.

Det er hevdet at selvantennning i høy normalt skjer innen 5 - 10 uker etter innsamling, men det kan skje etter flere år og tidspunktet vil således kunne variere i stor grad.

Fuktighetsanbefalinger

Selve tørkingen av høyet før det samles sammen er viktig. Cellene i høyet lever inntil vanninnholdet blir lavere enn 47-48%. Mye av vannet forsvinner i den hurtige innledende tørkefasen. Ved fuktigheter over 60% er stomata åpne og tørkingen foregår ekstra raskt i tørt varmt vær. Det er vanskeligere å senke fuktigheten til under 30%. Det sies at høy er mikrobiologisk tilnærmet helt stabilt når fuktigheten er under 12% og i likevekt med en relativ luftfuktighet på 65%, noe avhengig av temperaturforhold.

Store hauger, baller eller større stakker bør ha en fuktighet som ikke overstiger 15 - 18%. Mindre firkant-pakker med stor kjølede overflate kan ha en noe høyere fuktighet (20-25%). Dersom fuktigheten er enda høyere (20-30%) kan det være aktuelt å benytte preservativer. Det er viktig å unngå tilførsel av fukt fra taklekkasjer, gulvfuktighet, eller medbragt i fuktige høyklumper.

Tørkemidler kan benyttes ved behov og i litteraturen nevnes kalium- og natriumkarbonat, natriumsilikat, sitronsyre og salt. Den mikrobiologiske aktiviteten kan alternativt hemmes ved tilsetning av organiske syrer som propionsyre evt. blandet med eddiksyre eller sure salter som natriumdiacetat.

Tilsetning av ammoniakk eller urea hemmer også mikrobiologisk aktivitet. Tilsetning av melkesyrebakterier eller aerobe eller anaerobe bakterier er vurdert.

Temperaturforhold

Temperaturen kan måles i høy under lagring for å komme en begynnende selvantenningsprosess i forkjøpet. Det er imidlertid viktig å være klar over at høy har en god isolasjonsevne og at temperaturen vil kunne være forskjellig forskjellige steder i høyet. En tommelfinger-regel kan være:

- <55 °C, ikke unormalt og ingen problemer, men det kan videreutvikle seg, eller det kan være høyere temperaturer andre steder i høyet.
- 55 - 60°C, enda ikke noe problem, men gjenta målingene etter noen timer.
- 65 °C, temperaturen vil ha en tendens til å øke. Sikre kjøling, sjekk temperaturen ofte. Vær forsiktig dersom kjøling innebærer å flytte/vende på haugen eller lufte den. Dette kan gi en brannutvikling dersom det finnes andre soner i haugen med en enda høyere temperatur.
- 80-90 °C, selvantennning er under utvikling. De kjemiske prosessene har overtatt for de biologiske prosessene. Det vil kunne utvikle seg brann umiddelbart dersom man lufte høyet eller over tid dersom man ikke foretar seg noe.

Mål

Hovedmål:

Å senke antallet branner i låver og driftsbygninger i landbruket, som er forårsaket av spontan selvantennelse i høy og halm.

Dette innebærer at det innarbeides arbeidsrutiner som forhindrer selvantennelse i høy og halm. Det bør også utarbeides forslag til byggetekniske krav eller spesifikasjoner som forhindrer selvantennelse i høy og halm. Det kan også være aktuelt å foreslå spesielle brannsikringstiltak mot denne typen branner.

For å kunne oppnå dette settes det opp flere delmål:

- 1. Å finne fram til de betingelsene som danner det nødvendige grunnlaget for selvantennelse i høy og halm.*
- 2. Å kartlegge typiske betingelser ved lagring av høy og halm idag, for å finne fram til hvilke faktorer som ligger til rette for at spontan selvantennelse kan skje, og hvilke faktorer som kan forhindre at det faktisk skjer.*
- 3. Å utarbeide en egnet testmetode for bedre å kunne forutsi faren for selvantennelse i høy og halm.*
- 4. Å vurdere spesielle brannsikringstiltak mot denne typen branner.*

På bakgrunn av SINTEF sin erfaring med kompostering og termofil mikrobiologi, samt erfaring med anaerob (oksygenfri) mikrobiologi, ble det utarbeidet en hypotese for å kunne forklare biologisk forårsaket selvantennelse i høy.

- Høyet må være tilstrekkelig fuktig til å gi en høy mikrobiologisk aktivitet.
- Høyet må samles i så store mengder at den isolerende effekten er stor nok slik at temperaturen stiger i høyet.
- Høyet må stedvis være så vått at det dannes anaerobe (oksygenfrie) soner.

I disse anaerobe sonene dannes det kjemiske forbindelser som er stabile ved fravær av oksygen, men kan være svært ustabile ved en kombinasjon av høyere temperaturer (eks. 65 – 80°C) og tilførsel av oksygen. Under disse forholdene, for eksempel ved at oksygen trekkes inn i haugen ved vind, bevegelse eller diffusjon (som akselereres ved store temperaturforskjeller - pipeeffekt), vil den kjemiske oksydasjonen foregå raskere og raskere. Den utvikler mer varme enn avkjølingen kan ta seg av og de kjemiske reaksjonene overtar for de biologiske prosessene. En selvantenningsprosess er på gang. Dette er årsaken til at temperaturer rett over de biologisk akseptable temperaturene på 78 - 80°C er alarmerende.

På denne bakgrunn ble det satt opp mål for det innledende laboratoriestudie som denne rapporten omfatter:

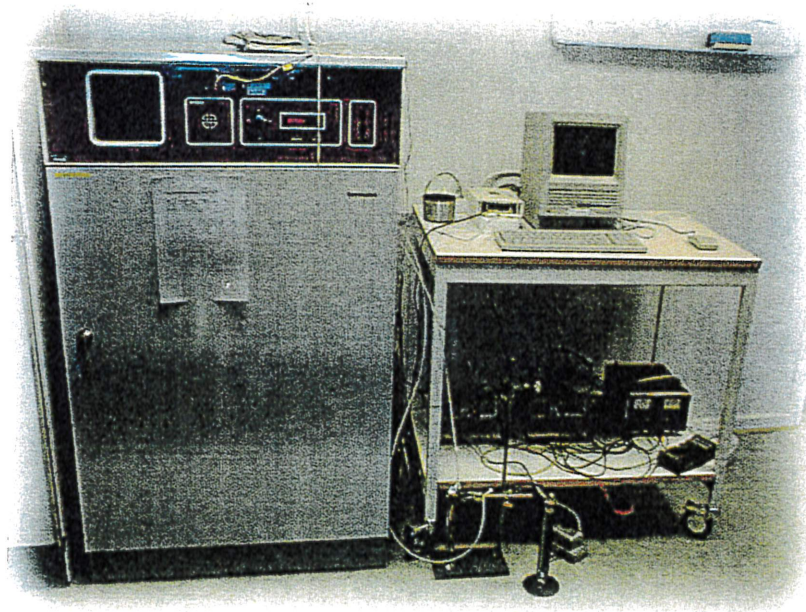
Å utføre et innledende studie i laboratorieskala for å finne en mulig sammenheng mellom anaerobe miljøer, det vil si miljøer hvor oksygenet er brukt opp, og selvantennning.

Dette innledende studie inngår således som en del av delmål 1.

Metoder

Forsøksoppsett - prinsipp

Prinsippet for det eksperimentelle studiet er at forsøksmateriale plasseres i en termos eller en forsøkspose plassert i et kammer/inkubasjonsskap og hvor temperaturen i inkubasjonsskapet reguleres som funksjon av temperaturen i prøven (Figur 1). Ved alltid å holde temperaturen i omgivelsene noe lavere enn temperaturen i prøven, vil en eventuell temperaturøkning skyldes en eksoterm reaksjon i prøven, enten biologisk aktivitet eller kjemiske eksotermiske reaksjoner, og at energien som utvikles er større enn kjølingen av prøven. Prøven vil kjøles, både ved direkte avkjøling av overflaten og ved oppvarming av eventuell tilført luft. I en fuktig prøve som luftes vil vanligvis den største kjølede effekten være fordampningen av vann. Mengden varme som skal til for å heve temperaturen i 1 kg høy med et vanninnhold på 45% fra 20 til 100°C krever om lag 50 kJ mens energien som skal til for å øke temperaturen i det assosierte vannet er om lag 150 kJ. Å fordampe vannet krever imidlertid om lag 1000 kJ (Currie og Festenstein, 1971).



Figur 1 Inkubasjonsskap hvor temperaturen reguleres ved bruk av data.

Inkubatorskap og temperaturkontroll

Forsøkene ble utført i et inkubasjonsskap (Termaks KB 222 IV). Skapet var ombygget slik at temperaturen ble regulert ved bruk av en Mac (SW Apple Macintosh) utstyrt med lab data (WorkBench 3.0, Strawberry Tree Incorporated, Computer Instrumentation and Control, 160

South Wolfe Road, Sunnyvale, California US) og programmert slik at temperaturen i skapet ble regulert som funksjon av prøven i prøvemateriale. Temperaturen i skapet ble målt på prøvematerialet sin overflate, enten på termosens overflate/utside eller på posens utside.

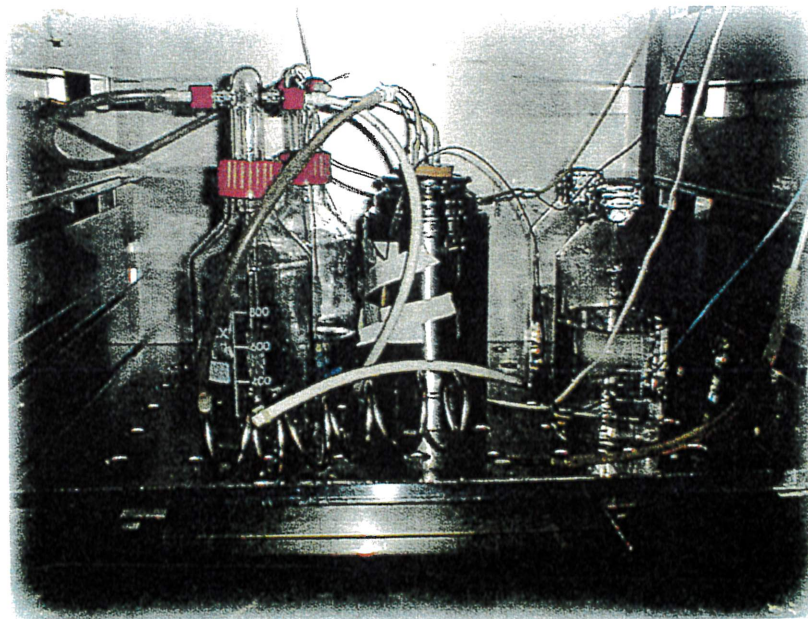
Temperaturen ble registrert ved bruk av termoelementer (copper/constantan termocouple). Som temperatur-sikring for å unngå en ukontrollert overoppheting var strømtilførselen til skapet regulert med en bryter som brøt strømmen dersom temperaturen inni inkubatorskapet, målt ved taket i skapet, oversteg en gitt forhåndsinnstilt temperatur. Under disse innledende forsøkene var denne sikringstemperaturen satt til 95°C.

Temperatur i inkubatorskap og i prøvemateriale ble registrert og logget hvert minutt. Enkelte forsøk ble utført i varmeskap av typen Termaks T119 UV. I disse forsøkene var prøvematerialet kun plassert i poser som var lett snørt sammen i toppen, og hvor temperaturen ble målt tidvis ved bruk av termometer.

Beholdere for prøvemateriale

Termos

Forsøkene ble utført ved bruk av 1 L termos (Eagle Sharp, Liltvedt Aage A/S, Grindbakken 1, Pb. 214 Røa, 0701 Oslo) med en bred åpning egnet for å fylle i eller ta ut prøvemateriale. Korken til termosen var erstattet med en gummikork med hull for temperaturmåler og inngående og utgående lufting/slange (figur 2).



Figur 2 Figuren viser termosen plassert inni inkubasjonsskapet, med tilhørende fuktighetsflasker, ledninger til termoelementer og lufttilførsel med temperaturstabiliserings spiralrør av stål.

Energitalpet i termosen ble beregnet ved å plassere en lyspære i termosen og nøyaktig måle energiforbruket ved en gitt temperaturredifferans mellom omgivelsestemperaturen og termosens indre temperatur. Energitalpet ble målt til 148 mW ved en temperaturredifferans på 2°C.

Lufting av prøver i termos

Luftingen ble foretatt gjennom 1/8" nylonlange som har liten oksygenpermeabilitet. Luften ble forvarmet i inkubatorskapet ved å passere gjennom et spiralrør av rustfrittstål, og forfuktet i 2 seriekoblede vaskeflasker med rent vann før den gikk inn i prøvematerialet. Lufthastigheten ble målt ved bruk av flowmeter (SHO-RATE, 2-1355-8506-7 M18191/1E, 0-250mL, Brooks Instruments BV, Veenendaal, Holland)). Luftpumpen var av typen WIZA Wuppertal (kun innblåsing) eller RENA 101 (innsug og utluft).

Poseforsøk

Prøvemateriale ble plassert i en 20 L plastpose (Sterilin, autoclavable disposal bag) og som er laget for å tåle autoklaving ved 121°C. Posen ble snøret i sammen i toppen ved bruk av hyssing.

Lufting av prøver i pose

Posen ble gjennomhullet med et varierende antall hull (2 til 25) på ca 5 mm, plassert spredt på overflaten. Luft ut av posen ble suget gjennom en 1/8" nylonlange fra posens sentrum ved bruk av en RENA 101 pumpe.

Oksygenmålinger

Oksygen ble målt med en oksygenmåler (paramagnetisk) av typen Taylor Servomex, Sybron Corporation OA262.

Vektmålinger

Prøvemateriale ble veiet før og etter inkubering (Sartorius, modell 4, max 2kg). For å kunne registrere fordampningen underveis ble hele inkubatorskapet plassert på en vekt (Berkel LC-100, max 200kg d=20g) med en oppløsning på 20g. Dette var en tilstrekkelig nøyaktighet for poseforsøkene med prøvemateriale på 2 - 5 kg, og hvor fordampningen utgjorde flere hundre gram i løpet av forsøkene.

Forsøksmateriale

Som forsøksmateriale er benyttet høy som ble tilsendt SINTEF etter kontakt med Norges Bondelag:

Høy fra Sør-Trøndelag Bondelag:

- Høy fra Joralf Østby, 7590, Tyldal.

Høy fra Rogaland:

- Flattørka høy fra sommeren 1999 på egen gard, 1. slått. Ivar Rege, Kleppev. 155, 4050, Sola.
- Flattørka høy fra sommeren 1998. vanskelig sommer med dårlige tørkeforhold. Første slått. Arild Ånestad, Borev. 291, 4532 Kleppe.
- Noe flattørket, men siste tørking på egen høytørke, sommeren 1999. Første slått. Bjarne A. Undheim, 4342 Undheim.
- Flattørka høy fra sommeren 1999. første slått. Olav R. Husveg, Husvegg, 4360 Varhaug.
- Flattørka høy fra sommeren 1999. Andre slått. Torfinn Harbo, Reime, 4365 Nærbø.

Gras, nyslått

Gras, slått med gressklipper utenfor SINTEF, og samlet inn med rake 5. mai 2000.

Kompost

Det ble hentet ferdig kompost fra Sogn komposteringsanlegg for hageavfall. Komposten var fra hageavfall i 1999, stabilisert og ferdig for salg. Hentet 14. april 2000. Komposten ble benyttet som inokulum, tilsetning av mikroorganismer, ved forsøksstart i enkelte forsøk.

Gjødsling

I enkelte forsøk ble høyet fuktet med en næringsløsning (Blomin - Blomsternæring for plante og stueplanter) som ble tilsatt vannet som ble benyttet til fukting av høyet ved forsøkets start.

Sikringstiltak

Forsøkene innebærer en spontan selvoppvarming, med mulighet for selvantennning. Det er lagt inn 3 sikringsnivåer i det eksperimentelle oppsettet for å unngå skader på laboratoriet:

- Maks temperatur - datainnstilling. Maks temperaturen på inkubatorskapet programmeres. Vannligvis er denne innstilt på 90°C, men kan avvike etter behov.
- Maks temperatur - ekstern kontroll (Digital temperature controller TUV Product Service MD-135, Arngren Electronics, Stasjonsveien 53, 0385 Oslo). Det er lagt inn en temperaturføler i inkubatorskapet som bryter strømmen til inkubatorskapet dersom en satt maksimumstemperatur nåes. Temperaturen settes vanligvis 5 grader høyere enn den programmerte maks temperaturen og trer først i funksjon dersom det programmerte temperaturkontroll-systemet svikter.
- Brannslukning - kullsyreanlegg. En slange som står under CO₂-trykk er lagt i en slynge inni skapet, rett over eller inn i prøvemateriale. Dersom temperaturen når 140°C smeltes det hull på slangen og en eventuell brannutvikling stoppes ved at inkubatorskapet fylles med CO₂.

Å sikre branner som oppstår som ulmebrann kan tenkes gjort med et tilsvarende system.

Resultater og diskusjon

Termosforsøk 1

I dette forsøket ble det tekniske oppsettet testet ut.

Videre var hensikten å teste ut om en anaerob inkubering av høy (uten tilgang på luft) kunne gi en temperaturøkningen i prøvematerialet.

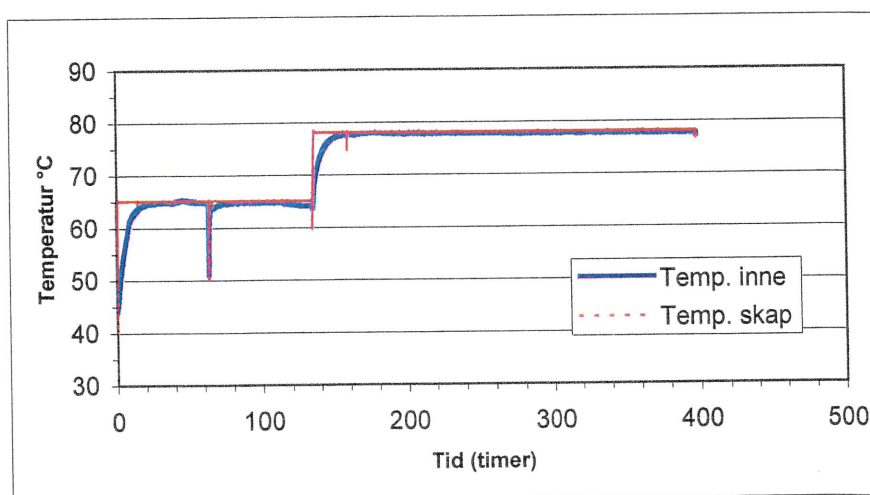
Prøven skulle deretter testes ut under aerobe betingelser (med tilgang på luft) ved høyere temperaturer.

Høyet skulle ikke være inokulert (tilsatt mikroorganismer).

Forsøksbeskrivelse

Fukter 50g høy fra Trøndelag (ca. 0,5L) med 250 mL springvann tilsatt 5g sukker. Etter fuktingen ble overskudd av vann (150 mL) helt av og det fuktete høyet (150g) fyllt i termosen. Det fuktete høyet skulle danne grunnlag for et oksygenfritt "råttent" miljø i termosen. Oppå det våte høyet ble det lagt 20g tørt høy.

Prøven ble inkubert ved høy temperatur med et nedre temperatur-setpunkt i inkubatorskapet på 75,6°C og med en differanstemperatur på 0,5°C. Det innebærer at dersom prøven enten er energi-nøytral eller forbruker energi, for eksempel til fordampning av vann, så vil temperaturen ligge på 75,6°C eller lavere. Dersom prøven utvikler energi og temperaturen i prøven overstiger setpunktet med 0,5°C, så vil temperaturen i inkubatorskapet stige slik at differanstemperaturen mellom temperaturen i skapet og i prøven ikke blir større enn differanstemperaturen på 0,5°C.



Figur 3 Temperaturen i den aerobe fasen av forsøket. "Temp inne" er temperaturen i prøven inne i termosen mens "Temp. skap" viser temperaturen i inkubatorskapet.

Resultater og diskusjon

Anaerob fase:

For å utvikle det anaerobe miljøet, så ble prøven ikke luftet. Den utviklet derimot noe gass, 12 mL det første døgnet, men deretter sank gassproduksjonen til 7 mL det andre døgnet for deretter å stoppe helt opp. Mest gass ble produsert 5 - 6 timer etter oppstart den første dagen.

Det var en målt differanstemperatur på $0,2^{\circ}\text{C}$ i denne perioden. Dette er en for liten temperaturdifferans til å gi en temperaturstigning i prøven.

Etter 5 dagers anaerob inkubering ved $75,6^{\circ}\text{C}$ ble termosen åpnet. Vekten av det våte høyet ble veiet til 234g. Det hadde fått en markert mørkere farge.

Aerob fase:

Etter den anaerobe fasen ble det samme høyet inkubert videre, men med et lavere temperatursettpunkt på 65°C , og prøven ble luftet 20 mL per minutt i 6 døgn. Temperaturen i denne perioden lå $0,5$ til 1°C under settpunktet. Avkjølingen skyldes sannsynligvis at noe varme tapes som fordampningsvarme, og den biologiske aktiviteten i denne prøven er for liten til å opprettholde eller øke temperaturen. Dersom luftingen ble slått av i kortere perioder, steg temperaturen i prøven til $0,1^{\circ}\text{C}$ over settpunktet.

Etter 6 døgn ved 65°C økes settpunktet til 78°C i 14 døgn med fortsatt samme lufting. Temperaturen i prøven ligger i denne perioden stabilt på $0,5^{\circ}\text{C}$ under settpunktet.

Resultatene viser at de anaerobe prosessene selv ikke var i stand til å gi en temperaturøkning i det eksperimentelle oppsettet. Dette er i overensstemmelse med praktiske erfaringer og våre forventninger. Det er imidlertid verdt å merke seg at det foregikk en viss gassproduksjon i prøvemateriale ved denne høye temperaturen. Det er mulig at dette i hovedsak skyldtes en gjæring av det tilsatte sukkeret (2 g).

Prøven var heller ikke istand til å skape en temperaturøkning i den etterfølgende aerobe fase. Det er mulig at luftingen var for kraftig og dessuten at den benyttede høy-prøven hadde for lite potensiale for å gi en temperaturøkning.

Det tekniske oppsettet fungerte bra i forsøket.

Anaerob inkubering ga ikke tilstrekkelig energi til å gi en temperaturøkning i dette forsøket.

Høyet bør tilsettes mikroorganismer i neste forsøk for å øke potensiale for å gi en temperaturøkning.

Termosforsøk 2

I dette forsøket skulle det undersøkes om prøver av høy kunne gi en temperaturøkning, uten tilsetning av karbonkilde, men med tilsetning av inokulum, under aerobe betingelser.

Forsøksbeskrivelse

Det ble laget en blanding av forskjellige tilsendte prøver:

Flattørket høy -99, grovt, Ivar Rege, Rogaland	50 g
Flattørket høy -98, Arild Ånestad, Rogaland	125 g
Flattørket og høytørket -99, Bjarne Undheim, Rogaland	50 g
Flattørket høy, første slått -99, Olav Husveg, Rogaland	25 g
Flattørket høy, andre slått -99 (noe fuktig), Torfinn Harbo, Rogaland	200 g
Høy fra Trønderlag	25 g
Innblandet høyet fra foregående forsøk (termosforsøk 1, svært våt prøve)	175 g

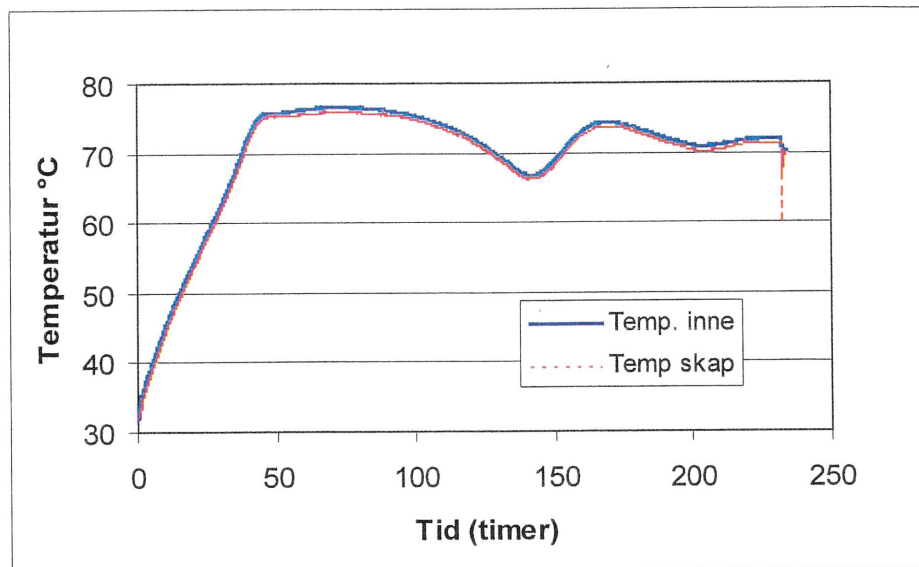
Høyet ble tilsatt 500 g fuktig kompost, og 750 mL springvann med 75g kompost innblandet. Prøvematerialet ble blandet svært godt sammen (15 minutters hånd-omblanding). Tørrstoffet på den ferdige prøven var på 39 % som tilsvarer et vanninnhold på 61%.

150 g av dette materiale ble presset inn i termosen og inkubert med et nedre setpunkt på 30°C og en differanstemperatur på 0,5°C. Luftingen ble innstilt på 10 mL per minutt.

Resultater og diskusjon

Temperaturen i prøven steg umiddelbart og med en hastighet på om lag 1°C per time til over 75°C og stabiliserte seg der (figur 4). Luften som ble tilført termosen var forfuktet. En kort periode rett før forsøket ble avsluttet, ble det forsøkt å la luften være tørr. Det resulterte i en umiddelbar temperatursenkning på om lag 0,5°C i prøven.

Resultatet minner meget om forsøket som beskrives av Currie og Festenstein (1971). De observerte en umiddelbar temperaturstigning til over 100 °C etter 39 og 41 døgns inkubering på dette viset ved 60 - 80 °C, men det krevet at temperaturen ble opprettholdt på kunstig vis i perioder. En videre inkubering under disse forhold kunne således ha ført til en rask kjemisk oksidasjon, også i våre forsøk. En slik temperaturstigning skyldes en innledende biologisk og senere en kjemisk forårsaket uttørking og er en kontinuerlig aerob prosess. Forsøket ble imidlertid avsluttet etter 10 døgn.



Figur 4 Temperaturen i prøven (Temp. inne) over en periode på ca. 10 døgn. De jevne svingningene skyldes ikke ytre variasjoner i forsøksparametrene (Termosforsøk 2).

Poseforsøk 1

Hensikten med forsøket var å studere hvordan høy, inkokulert med mikroorganismer og tilsatt fuktighet, oppførte seg i en noe større mengde inkubert ved 30°C.

Forsøksbeskrivelse

Resten av prøvemateriale som ble blandet sammen til termosforsøk 1 (1825 g, om lag 12 L), ble fylt i en termostabil plaspose (Sterilin Autoclavable Disposal Bag). Posen ble løst rullet sammen i toppen for å hindre uttørking, og ble inkubert i et varmeskap ved 30°C.

Resultater og diskusjon

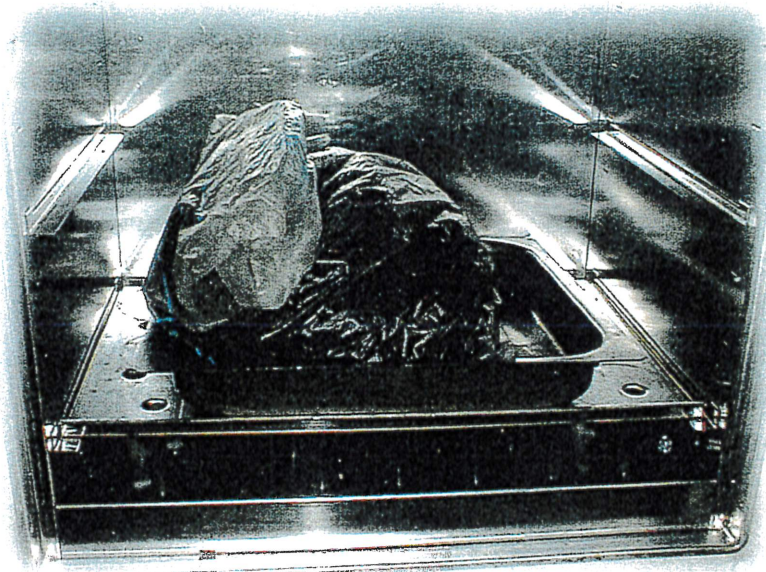
Temperaturen i høyet steg til 36°C i løpet av det første døgnet, men temperaturen ble ikke registrert kontinuerlig. Etter 10 døgn var temperaturen i høyet sunket til 33°C eller 3 grader mer enn i omgivelsene. Da posen ble åpnet viste det seg at det var blitt en tørr sone i midten av prøven, mens den fremdeles var fuktig rundt langs kanten (figur 5). Dette skyldes sannsynligvis at posen er kjøligere langs kanten enn i midten, samtidig som posen rundt hindrer at dette tørker ut.

Dette er en viktig observasjon siden det samme kan skje i lagret høy. Siden temperaturen er høy inni sentrum, vil vannet fordampe her mens det kondenserer lengre ut langs overflaten hvor temperaturen er lavere. Dette sikrer en biologisk aktivitet i randsonen som har tilgang både på oksygen utenfra og fukt innenfra, og bidrar til at temperaturen i høyet opprettholdes. I sentrum er det derimot oksygenfritt og tørt. Dersom oksygen kommer til denne tørre, oksygenfrie varme sonen midt inni høyet, vil det kunne initiere en kjemisk oksidasjon.

Disse tørre forholdene i sentrum av høyet påpeker Currie og Festenstein allerede i 1971, men de knytter det ikke til en oksygenfri sone: "Some moisture is required at all stages of self-heating but the quantity must decrease progressively if self-ignition is to occur, because, contrary to popular belief, wet hay does not catch fire. Moisture must move outwards by diffusion in the vapor phase. The partial pressure gradient necessary for diffusion results from the increase in vapor pressure gradient with temperature within the stack." Videre hevder Currie og Festenstein (1971) at hvis høystakken er for stor, vil uttørkingen sentralt kunne bli for langsam: "The average vapour pressure gradient and hence vapour flux is proportional to the linear dimensions, so that, in too large a stack, water may be lost too slowly." Denne påstanden er selvsagt diskutabel, men interessant. Dersom det medfører riktighet, så vil det finnes både en minste og en største størrelse for å få selvantennning. Det er imidlertid nærliggende å tro at den maksimale størrelsen heller vil påvirke på hvilket tidspunkt forholdene ligger til rette, mer enn om selve fenomenet vil kunne oppstå. Problemstillingen knyttet til vanninnhold og selvoppvarming av brennbare materialer er forøvrig grundig diskutert i en artikkel til Xiao Dong Chen (1998).

Uansett så vil høyets porøsitet og gjennomtrengelighet for innkommende oksygen, og utgående fuktighet være av sentral betydning, i tillegg til høyets biologiske potensiale.

Dersom selvantennning er avhengig av en fuktig aerob sone som gir høy temperatur, og forbruker oksygenet, og en oksygenfri tørr varm sone, så er dette vanskelig å gjøre i én lukket termos. Betingelsene kan enten tenkes oppnådd i en større prøve, gjerne en plastpose på 5 - 15 L som rommer flere ulike miljøer slik vi ser det i poseforsøk 1, eller ved å kombinere flere termoser.



Figur 5 Bildet viser posen med høy plassert i inkubasjonsskapet (over), og hvordan fuktigheten beveger seg utover, mens posens sentrale kjerne tørker ut på grunn av temperaturforskjeller.

Poseforsøk 2

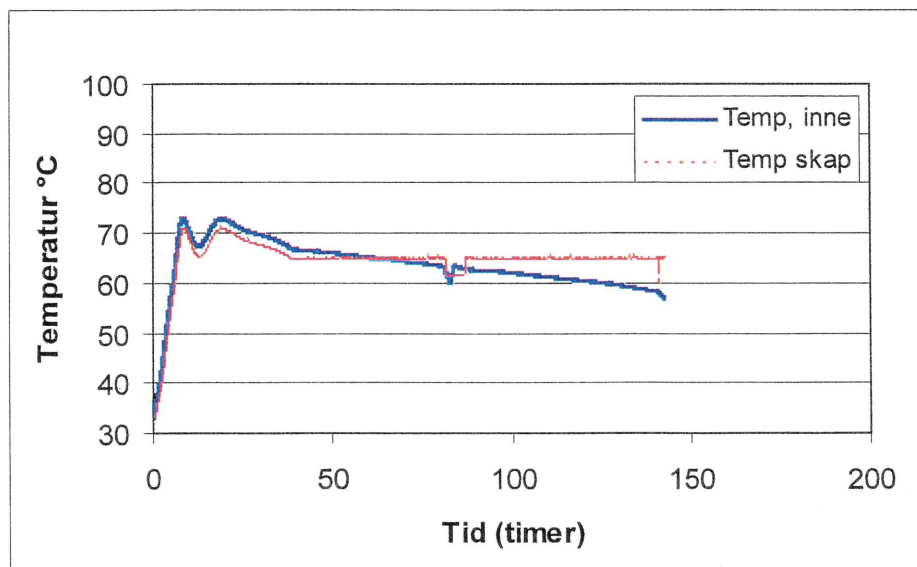
Hensikten med dette forsøket var å se om det var mulig å studere selvoppvarmingsprosesser i høy kun ved å samle høyet i en pose, uten bruk av termos. Dette ville kunne gi et mere sammensatt miljø i prøven, noe som ikke er lett å oppnå ved bruk av en enkel termos.

Forsøksoppsett

I dette forsøket benyttes alt høyet fra poseforsøk 1. Dette tilsettes om lag 100g nytt tørt høy fra Trøndelag og om lag 100g av høyet fra termosforsøk 1. Totalvekten av høyet med posen er på 1632 g. Posen snøres igjen i toppen med en snor og gjennomhulles med 24 hull (0,5 cm i diameter, bare stukket - ikke stanset ut). Hullene fordeles jevnt rundt posens overflate, men ikke i bunnen hvor mulig kondens samles. Posen legges på et metallfat og inkuberes med et setpunkt på 30°C og en differanstemperatur på 2°C.

Resultater og diskusjon

Temperaturen steg svært raskt, nesten 5°C per time, til noe over 70°C hvor temperaturen holdt seg noen dager. Det luktet i denne perioden relativt sterkt fra inkubatorskapet. Etter 3 døgn sank temperaturen og inkubatorskapet ble satt med et nedre setpunkt på 64°C for å hindre videre temperaturfall. Temperaturen sank imidlertid videre om lag 2°C per døgn til 58°C etter 3 døgn. Prøven ble da åpnet. Det viste seg at høyet nå var blitt tørt langs randen, men hadde en noe fuktigere kjerne. Dette skyldes sannsynligvis at temperaturen var kunstig opprettholdt ved å sette setpunktet på 64°C. Fordampningen av vannet i prøven senket temperaturen videre ned med 6°C og fuktigheten holdt seg da lengst i kjernen. Dette i motsetning til et naturlig selvoppvarmet system som vil være kjøligere langs overflaten.



Figur 6 Temperaturutviklingen i forsøket utført i en pose, uten bruk av termos, og hvor høyet selv danner den temperaturisolerende barrieren.

Prøvens vekt etter forsøket var på 787 g. Det hadde altså fordampet om lag 737 g vann. Noe vekttap vil imidlertid kunne skyldes nedbrytning av materiale og dannelse av karbondioksid og vann som fordamper.

Resultatene tyder på at prøven innledningsvis har hatt tilstrekkelig tilgang på:

- Tilgjengelig nedbrytbart substrat
- Oksygen
- Organismer som kan bryte ned substratet ved høye temperaturer
- Isolasjon som holder på varmen
- Fuktighet

En, eller flere av disse faktorene har imidlertid blitt "brukt opp" i løpet av 3 - 7 døgn.

Inni sentrum av posen var det imidlertid tegn på mindre biter av "forkullet karakter".

Resultatene av forsøket viser at det kan være mulig å utføre forsøk, kun ved bruk av høy samlet i temperaturstabile poser isedefor bruk av termos.

Poseforsøk 3

Hensikten med dette kortvarige forsøket var å få et inntrykk av hva som virket begrensende i foregående poseforsøk, fuktigheten, oksygenforholdene eller tilgjengelig gjenværende energi i høyet.

Forsøksbeskrivelse

Det samme prøvemateriale ble blandet sammen på nytt, i den samme posen (med de samme hullene), og tilsatt nytt vann (750 mL). Prøven ble inkubert med et settpunkt på 30°C og med en differanstemperatur på hele 5°C.

Resultater og diskusjon

Temperaturen i prøven steg påny meget raskt, om lag 5°C per time til 65°C, men stabiliserte seg på denne temperaturen. Oksygeninnholdet i midten av prøven ble målt til 8%. Differans-temperaturen ble senket til 3°C, noe som førte til en midlertidig temperaturøkning på 1°C per time, til 67,8°C. Etter noen timer synker temperaturen igjen, selv om oksygeninnholdet i sentrum av prøven nå måles til 14%. Forsøket avsluttes og prøven veies. Det viser seg at vekttapet har vært på 137 g, eller om lag 100g per døgn.

Resultatene tyder ikke på en avgjørende oksygenbegrensning. Prøven hadde heller ikke fått tid til å bli for tørr. Vi må også forvente at de samme mikroorganismene er tilstede i prøven. Det er derfor sannsynlig å konkludere med at for mye av det lett tilgjengelige substratet var blitt brukt opp i foregående forsøk og i innledende fase av dette forsøket.

Resultatene av de 2 inkuberte poseforsøkene tyder på at de har vært for intensive. Fordampningen har blitt for kraftig, og det tilgjengelige substratet har blitt brukt opp for raskt. En mindre lufting av prøvemateriale, og en mindre differans-temperatur kan simulere de naturlige betingelsene bedre.

Poseforsøk 4

For å få prosessen til å bli mere langvarig og mindre intensiv, ble prøven innledningsvis luftet mindre ved å benytte færre hull i posen.

Forsøksbeskrivelse

Om lag 1 kg tørt høy fra Trøndelag ble blandet med om lag 1 kg høy fra foregående forsøk og fuktet med ca 2,5 L springvann vasket ut med mikroorganismer fra foregående forsøk. Vannet ble også tilsatt blomstergjødsel. I prøvens sentrum ble det lagt inn en tettpakket og fuktig "ball" av prøvematerialet, om lag 8 cm i diameter. Prøvens totalvekt var på 4,5 kg.

Posen ble gjennomhullet med 5 hull, ett i hver retning og ett i toppen. I hullene ble det satt nylon plastrør på 1/8" og med en lengde på 1 cm.

Prøven ble inkubert ved 30°C setpunkt og med en differanstemperatur på 5°C.

Resultater og diskusjon

Temperaturen steg bare med 0,6°C til 30,6°C første dagen. En luftprøve fra prøvens sentrum viste at alt oksygene var brukt opp. Posen ble derfor utstyrt med 5 nye tilsvarende hull, og det pumpes ut luft fra prøven (100 mL per minutt) i ca. 2 timer. Dette førte til at oksygeninnholdet økte fra 0% til 13% og temperaturen økte til 34°C. Oksygenet ble imidlertid brukt opp i løpet av 3 timer, og temperaturøkningen stoppet opp. Differanstemperaturen ble deretter senket fra 5 til 2°C. Temperaturen økte deretter med 10 °C til 44°C neste dag. Det ble målt 2% oksygen i sentrum av høyet. Oksygenivået sank imidlertid til 0% i løpet av dagen. Denne gassen var ikke brennbar og luktet ubehagelig.

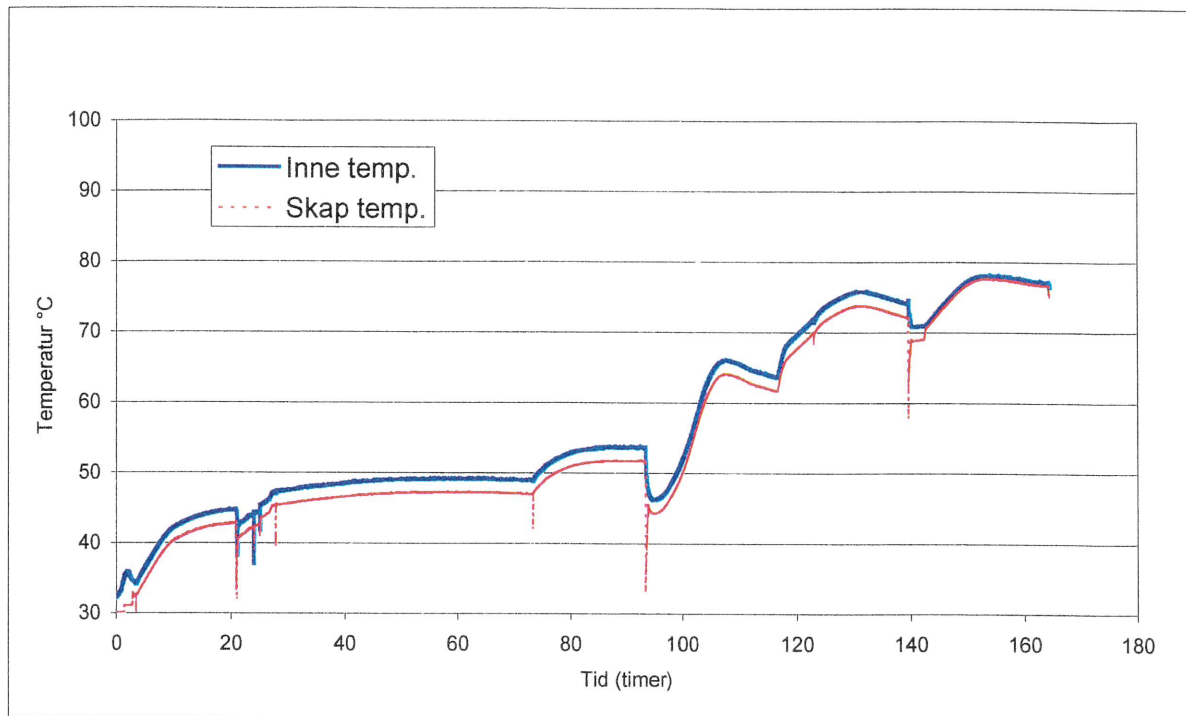
En undersøkelse av temperaturfordelingen i prøven viste om lag 1°C høyere temperatur noe utenfor sentrum. Dette skyldes sannsynligvis at oksygenet trenger inn utenifra og varmesonen blir derfor noe perifer.

Temperaturen økte svært sakte til om lag 50°C i løpet av de neste 3 dagene. På grunn av den ubehagelige lukten fra prøven, ble hele forsøksoppsettet flyttet fra laboratoriet til et godt ventilert kjeller-rom.

Hele inkubatorskapet, med prøve, ble satt på vekt slik at fordampningen av prøven kunne følges kontinuerlig. Prøvens totalvekt var 4,44kg. Prøven ble luftet kontinuerlig (100 mL/min) over natt. Dette førte til en rask temperaturøkning til om lag 66°C, men begynte så å falle på grunn av tapt fordampningsvarme.

Luftingen ble stanset og temperaturen økte til 76°C, men avtok igjen til om lag 72°C. Oksygeninnholdet ble målt til 2%.

For å senke kjølingen ble differanstemperaturen senket fra 2°C til 0,5°C og det ble satt inn et beger med rent vann i inkubatorskapet for å senke fordampningen. Dette førte til at temperaturen steg til hele 78,1°C, men sank så sakte.



Figur 7 Temperaturutviklingen i poseforsøket. De første 4 døgnene ble prøven luftet svært moderat, og målinger viste at oksygen manglet. Etter om lag 100 timer ble prøven luftet og dette resulterte i en kraftig temperaturøkning.

Resultatene viser at det er et potensiale i prøven til å nå de aller høyeste temperaturer man kan forvente å oppnå med biologisk aktivitet - temperaturer på 80°C regnes som alarmerende. Det var imidlertid nødvendig å stadig gå inn og variere med luftingen.

I fremtidige forsøk bør luftingen styres som funksjon av oksygenkonsentrasjonen i prøven. Når eksempelvis oksygeninnholdet synker til under 2%, luftes prøven, men luftingen stopper når konsentrasjonen stiger til over 3%. Dette vil sikre den biologiske aktiviteten, men hindrer for mye varmetap. Grenseverdiene må velges utfra om vi vil studere aerobe eller anaerobe prosesser.

Det er også mulig at prøvemateriale inneholder for lite lett oksiderbare stoffer til å overstige 78°C, eksempelvis anaerobt akkumulerte stoffer.

Det er verdt å merke seg i dette oppsettet at anaerobe forhold best ble oppnådd ved noe lavere temperaturer. Ved temperaturer over 70°C synker den biologiske aktiviteten mens diffusjonshastigheten av luft øker. Mot slutten av forsøket ser vi at oksygenet steg til hele 16% uten aktiv lufting. Ved senere temperatursenkning, på grunn av avbrudd i varmen i inkubatorskapet, sank oksygenivået noe igjen, og den ubehagelige lukten ble sterkere.

Konklusjoner og vurderinger

Temperaturøkning til over 75°C:

Termosforsøk i 1 liters skala og forsøk utført i poser i 10 liters skala kan begge gi temperaturøkninger opp til over 75°C i de testede forsøksoppsettene. Temperaturøkningen ble kun oppnådd under aerobe betingelser, det vil si ved tilgang på luft og når prøvene av høy var blitt fuktet og tilsatt mikroorganismer.

Sammensatte miljøer:

Uttørking av høyet

Forsøkene ved bruk av poser, viser at det foregår en uttørking av kjernen i prøven. Det er sannsynlig at denne uttørkingen er en forutsetning for en senere selvantennning. En slik uttørking krever en større temperaturdifferans mellom omgivelsene og kjernen i prøven og den krever at den høye temperaturen opprettholdes over tid.

Varmesonen flytter seg

Resultatene av poseforsøkene kunne tyde på at den biologisk tilgjengelige energien i høyet kunne brukse opp over relativt kort tid. Det er mulig at den tilgjengelige energien i ett område i høyet er for liten til å opprettholde temperaturer over 70°C over lengre tid, som jo er nødvendig for å tørke ut høyet. Det er derfor sannsynlig at "varmesonen" i høyet flytter seg etter oksygen og fuktighetsbetingelser under virkelige forhold.

Bruk av sammenkoblede termos

Siden vi foreløpig kan konkludere med at sonen for selvantennning er varm og tørr (>78°C), mens sonen for mikrobiologisk oppvarming er fuktig og med temperaturer under 78°C, helst under 70°C, må disse sonene være adskilt. De må også være adskilt eksperimentelt. Dette kan gjøres ved å koble sammen flere termos og la temperaturen styres av den til en hver tid varmeste prøven. Dette kan simulere hvordan oksygenet trenger innover i høyet. Hvilken prøve som er varmest vil kunne variere med tiden. Dette simulerer en naturlig situasjon hvor varmen spres fra den biologisk mest aktive sonen til andre områder i høyet, og hvor den mest intense biologiske varmesonen sannsynligvis flytter seg. Samtidig etableres en tørr anaerob sone, som kan etablere et brennbart miljø dersom oksygen siden trenger inn i dette miljøet. Det må skje før temperaturen faller for lavt, dersom kjemisk selvoppvarming skal forekomme.

Dannelse av "forkullede stråler"

En varm anaerob tørr sone vil kunne forkulles der hvor oksygen trenger inn. Dette kan tenkes å skje inn i visse mere permeable kanaler i høyet og det kan tenkes at det vil dannes forkullede stråler ut fra kjernen. Dersom oksygentilførselen igjen avtar, for eksempel fordi trekk eller vind avtar, så vil den forkullede strålen stanses opp. Den vil kanskje ikke så lett reetablere seg i samme retning fordi mye av høyet i denne retningen er brent opp, på samme måte som en bråtebrann brenner seg utover. Dersom den stanses opp i en retning, vil den ha vanskelig for å spre seg i samme retning på et senere tidspunkt.

Biologisk aktivitet synker over 70°C

Forsøk utført i pose viste at ved temperaturer under 70°C var den mikrobiologiske aktiviteten høy, og oksygenet ble brukt opp. Når temperaturen steg til over 70°C synker den biologiske aktiviteten og oksygenet trenger lengre innover i prøven. Det er viktig å få innsikt i om dette også skjer under naturlige betingelser.

Kompost selvantenner sjeldnere

Det at selvantenneing sannsynligvis krever at høyet blir liggene stabilt, slik at visse soner tørker ut, kan forklare hvorfor selvantenneing sjelden skjer i kompost. Kompost er jo optimalisert for å opprettholde biologisk aktivitet i hele massen over lang tid, helt til massen har stabilisert seg.

Hvilke kjemiske reaksjoner kan være aktuelle for spontan selvantenneing - anaerobe soner og høyetts sammensetning

Vi vil på et senere tidspunkt gå nøye gjennom ulike aktuelle kjemiske reaksjoner, basert på litteratordata. To faktorer som har vært lite diskutert og som vi anser som viktige, er:

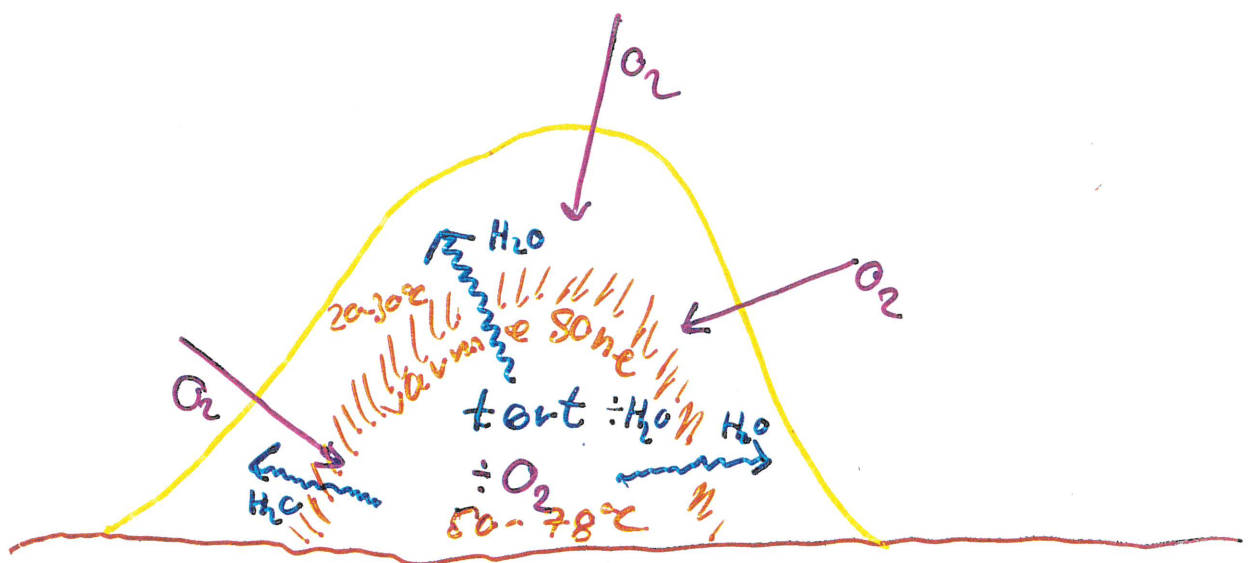
1. Anaerobe soner: I anaerobe soner dannes det kjemiske forbindelser som er stabile ved fravær av oksygen, men kan være svært ustabile ved en kombinasjon av høyere temperaturer (eks. 65 – 80°C) og tilførsel av oksygen. Under disse forholdene, for eksempel ved at oksygen trekkes inn i haugen ved vind, bevegelse eller diffusjon (som akselereres ved store temperaturforskjeller - pipeeffekt), vil den kjemiske oksidasjonen foregå raskere og raskere. Den utvikler mer varme enn avkjølingen kan ta seg av og de kjemiske reaksjonene overtar for de biologiske prosessene. En selvantenningsprosess er på gang. Dette er årsaken til at temperaturer rett over de biologisk akseptable temperaturene på 78 til 80°C er alarmerende.
2. Høyetts sammensetning: I tillegg vil vi hevde at høyetts sammensetning og innblanding av ulike urter og frø kan ha betydning. Vi vet at en oljefille kan selvantenne. Det er mulig at oljerike frø kan bli ødelagt ved temperaturer over 70°C og at oljen kan spre seg i det tørre høyet. Dette er betingelser som kan minne om en fille med olje. Dette vil i så fall innebære at typen ugras eller iblandete urter kan ha betydning for tendensen til selvantenneing. Også tidspunktet, modningen av frøene vil være av betydning. Dersom dette er tilfelle, vil det kunne være med å forklare regionale forskjeller med hensyn til faren for selvantenneing i høy og halm.
3. I tillegg må det presiseres at høyet må være tørt, og at dette gjerne må være i kombinasjon med det som nevnes under punktene 1 og 2.

Disse punktene må ikke underkjenne nødvendigheten av den forutgående mikrobiologiske aktiviteten som nettopp danner grunnlaget for betingelsene som er nevnt under punktene 1 - 3.

En arbeidshypotese

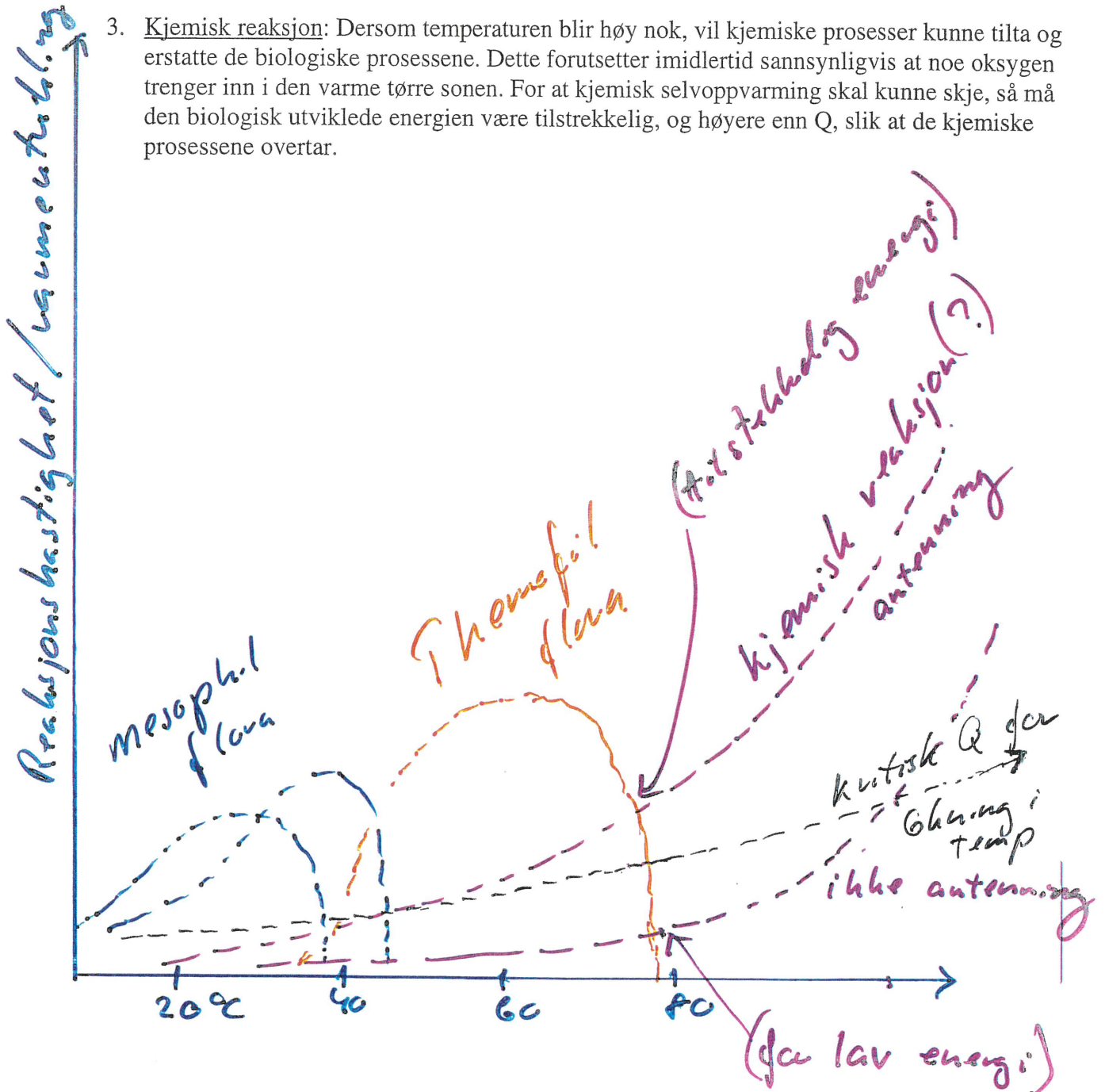
Nedenfor er skissert hvordan vi tenker oss at utviklingen av en selvantenne kan foregå. Skisse 1 under viser en systematisert høystakk. Hypotesen er videreutviklet fra den hypotesen som ble presentert tidligere i rapporten "Selvantenning i høy, halm og fôr" (Briseid og Eidså, 1999):

1. Høy med en litt for stor fuktighet legges sammen. Fuktigheten og tilstedeværelsen av mikroorganismer danner grunnlaget for en temperaturøkning opp til 70 - 78°C i hele høyet.
2. Oksygenet trenger inn fra overflaten, og kjerneområdet blir fritt for oksygen, mens varmesonen er noe mer perifer. Kjernen varmes imidlertid opp av varmesonen.
3. Den biologisk tilgjengelige energien i varmesonen brukes opp og sonen flytter seg innover mens oksygenet stadig trenger dypere innover i høyet.
4. Den varme sonen i kjernen tørker ut ved at vandamp diffunderer utover og kondenserer ut nærmere overflaten. En viss uttørking forekommer også helt på overflaten.
5. Dersom tørr luft med oksygen trenger inn gjennom den fuktige biologisk aktive varmesonen, enten på grunn av plutselige fysiske forstyrrelser, eller på grunn av vind eller trekk (pipe-effekt i høyet eller hull i underlaget) vil det settes igang en kjemisk oksidasjon i kjernen, med påfølgende forkulling. En brann vil først kunne utvikle seg dersom trekken fører oksygen inn over tid, slik at den kjemiske oksidasjonen når gjennom en kanal gjennom den biologisk aktive fuktsonen og ut i tørt overflatehøy.



Sammenhengen mellom biologisk utviklet energi og kjemisk utviklet energi er skissert i skisse 2 (under):

1. Biologisk oppvarming: Skissen viser hvordan den mesofile og den termofile mikrobiologiske floraen utvikler energi ved temperaturer under 78°C.
2. Fysisk kjøling: For at temperaturen skal øke må energiutviklingen være større enn varmetapet. Dette er angitt som kritisk Q i figuren. Q øker med temperaturen fordi varmetapet øker med temperaturen. Forholdet mellom overflate og volum er også kritisk for verdien av Q. Dette er årsaken til at fuktigere høy må pakkes i mindre volum. Utetemperaturen har også innflytelse på verdien av Q, likeledes fordampningsvarmen/kjølingen av overflaten.
3. Kjemisk reaksjon: Dersom temperaturen blir høy nok, vil kjemiske prosesser kunne tilta og erstatte de biologiske prosessene. Dette forutsetter imidlertid sannsynligvis at noe oksygen trenger inn i den varme tørre sonen. For at kjemisk selvoppvarming skal kunne skje, så må den biologisk utviklede energien være tilstrekkelig, og høyere enn Q, slik at de kjemiske prosessene overtar.



Videre arbeid

I forbindelse med arbeidet i dette forprosjektet har vi blitt klar over viktige problemstillinger som vi må få en økt forståelse av for å kunne nå hovedmålet:

Å senke antallet branner i låver og driftsbygninger i landbruket, som er forårsaket av spontan selvantennelse i høy og halm.

Dette er knyttet opp mot de delmålene som er skissert innledningsvis i denne rapporten.

Delmål 1

Å finne fram til de betingelsene som danner det nødvendige grunnlaget for selvantennelse i høy og halm.

Kjemisk oksidasjon

Det er nå viktig å studere den kjemiske prosessen som skjer fra 70 - 78°C og oppover.

Aerobe og anaerobe betingelser

Denne kan studeres både som en ren aerob prosess, og som en tilførsel av luft med oksygen etter en forutgående anaerob prosess. Anaerobe forhold kan studeres ved tilførsel av anaerob gass, for eksempel nitrogen blandet med karbondioksid, eller ved tilførsel av luft fra en termosreaktor hvor mikrobiologisk vekst i høy har brukt opp oksygenet i luften.

Høyet kan tørkes, både ved å varme opp luft fra 20°C, eller ved å la luft passere gjennom en standardisert vandig saltløsning.

Fuktighetsbetingelsene

Det er hevdet at også den kjemiske prosessen er avhengig av en viss fuktighet. Kan dette være avgjørende for om selvantennelse skal kunne skje?

Temperatur

Temperaturen kan reguleres enten kunstig ved tilførsel av varme, som etterligner varmeoverføring fra en annen sone i høyet, eller ved at biologisk vekst i en annen termosreaktor regulerer temperaturen i hele inkubatorskapet.

Betydningen av høyets sammensetning

Effekten av forskjellig sammensetning av høyet på den kjemiske oksidasjonen studeres, både innblanding av andre frøplanter, og ulike høytyper/fraksjoner av høy.

Biologiske faktorer

Det er viktig å studere i hvilken grad den innledende biologiske varmegangen varierer i ulike prøver.

Den mikrobiologiske floraen

Er tilgangen på den mikrobiologiske floraen avgjørende? I så fall bør antallet av mesofile og termofile mikroorganismer undersøkes. I dag er dette ett av kriteriene som brukes for å avgjøre om en brann kan ha vært forårsaket av spontan selvantennning.

Er visse spesielle typer mikroorganismer avgjørende? Kan det for eksempel tenkes at visse typer sopp skiller ut spesielt brennbare stoffer, eller selv danner et mycel som er spesielt brennbart når det tørkes?

Fuktighetsbetingelsene

Vi vet at fuktigheten er en nødvendig forutsetning for biologisk aktivitet, men er de aktuelle fuktighetsbetingelser avgjørende og tilstrekkelig for å få en innledende biologisk varmegang?

Høyets sammensetning

Også førets sammensetning med hensyn til type høy, tilstedeværelsen av andre planter eller forurensninger av kompost, jord eller lignende kan være av betydning for den biologiske fasen.

Fysiske forhold

Høyets tetthet, evne til å holde på vann og dets isolasjonsevne kan variere. Likeledes kan høyets tenntemperatur, målt med tradisjonelle metoder, kunne variere. Også disse forholdene vil kunne ha en innflytelse på faren for selvantennelse.

Delmål 2

Å kartlegge typiske betingelser ved lagring av høy og halm i dag, for å finne fram til hvilke faktorer som ligger til rette for at spontan selvantennning kan skje, og hvilke faktorer som nesten alltid forhindrer at det faktisk skjer.

Det er viktig på et tidlig tidspunkt å studere hvordan høy og halm lagres, med hensyn på faren for selvantennning. Her vil arbeidsrutiner og byggtekniske forhold være av betydning. Likeledes hvordan lagringen skjer rent fysisk, størrelsen på høyansamlinger, plasseringen i bygningen og andre forhold. Likeledes hvordan innhøstingen foregår.

Det vil i denne sammenhengen også være viktig å måle oksygenbetingelser, temperaturbetingelser og fuktighetsbetingelser i høyet, og gjøre noen mere grundige studier av prøver fra ulike steder i henhold til punktene under delmål 1.

Delmål 3

Å utarbeide en egnet testmetode for bedre å kunne forutsi faren for selvantennelse i høy og halm.

Siden det ikke finnes noen god eller standardisert metode egnet for å kunne teste høy og halm med hensyn på faren for selvantennelse, så langt vi kjenner til, bør dette kunne utvikles. Allerede de innledende studiene i dette prosjektet viser at dette bør være en todelt undersøkelse, en som sier noe om faren for biologisk varmegang og en som sier noe om faren for en videre kjemisk reaksjon. Det er mulig at det på et senere tidspunkt vil kunne vise seg at kun en av disse testene vil være nødvendig. Metoden(e) bør være enkle å utføre.

Delmål 4

Å vurdere spesielle brannsikringstiltak mot denne typen branner.

Allerede i disse innledende studiene ser det ut til at visse tiltak burde kunne være til hjelp mot denne typen branner. Dette gjelder både bygningstekniske forhold og arbeidsrutiner. Likeledes bør det kunne installeres visse tekniske brannsikringstiltak mot denne typen ulmebranner. Sikringstiltak som vi benytter på laboratoriet, kan tenkes benyttet i full skala. Det er imidlertid viktig å få en innsikt i omfanget av denne typen branner i Norge, før større ressurser settes av til denne typen tiltak.

Det er sterkt ønskelig om en kontinuitet i arbeidet er mulig, slik at allerede årets sesong kan benyttes i disse studiene som er skissert her.

Referanser

- Aleksandrov et al. (1979)
Study of changes in redox potentials in the autoxidation and spontaneous heating of shredded peat (rus.)
Tr. – Mosk. Khim.-Tekhnol. Inst. im. D. I. Mendeleeva, Vol 105, 22-27.
- Briseid og Eidså (1999)
Selvantenning i høy, halm og fôr.
SINTEF rapport, Oppdrag nr.:660021.44
- Chen,X.D. (1998)
On the fundamentals of diffusive self-heating in water containing combustible materials.
Chemical Engineering and Processing 37, 367-378.
- Currie,J.A. og Festenstein,G.N. (1971)
Factors defining spontaneous heating and ignition of hay
J. Sci. Fd. Agric., Vol 22.
- Hoffman, E. J. (1935)
J. agric. Res., 51, side 527.
- Hoffman, E. J. og Bradshaw, M.A. (1937)
J. agric. Res., 54, side 159.
- Falyushin et al. (1980)
Effect of the cation composition of peat on its autoignitability during storage (rus.)
Torf. Prom-st., nr. 2, 26-29.
- Falyushin et al. (1990)
Prediction of spontaneous ignition of peat (rus.)
Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Gorn. Zh., nr 7, 32-26.
- Falyushin,P.L. et al. (1994)
Determination of the spontaneous ignition of peat (rus.)
Khim. Tverd. Topl. (Moscow), nr. 4-5, 62-68
- Firth, J.B. og Stuckey, R.E., (1945)
J.Soc. chem. Ind., London, 64.
- Jacobsen,M., Nagy,J., Cooper,A.R. og Ball,F.J. (1961)
Explosibility of Agricultural Dusts.
Report of Investigation, No.5753, Bureau of Mines, United States Dept. of the Interior.
- Kawakami,K. (1980)
Studies on spontaneous ignition of hay, temperature of ignition and spontaneous heating (på Japansk)
Memoirs of Hokkaido Branch of the Japanese Soc. of Agric. Mach, 21, side 212-215.

- Kawakami, K. (1982)
Studies on spontaneous heating of hay, effects of hay moisture and density (på Japansk)
Memoirs of Hokkaido Branch of the Japanese Soc. of Agric. Mach, 23, side 21-25.
- Korsaksel, André, Anders Sandberg og Odd Rød, 1999
Undersøkellesgruppen for branner i driftsbygninger der dyr var involvert - UGBD
Statens bygningstekniske etat, Direktoratet for brann og eksplosjonsvern, Gjensidige.
- Milner, M. og Geddes, W.F. (1946)
Cereal Chem., 23, side 449.
- Lishtvan et al. (1993)
Physical chemistry of peat autoxidation (rus.)
Vestsi Akad. Navuk Belarusi, Ser. Khim. Navuk, nr. 2, 6-12.
- Lishtvan et al. (1993)
Predicting spontaneous ignition of peat during storage (rus.)
Vestsi Akad. Navuk Belarusi, Ser. Khim. Navuk, nr. 3, 12-17.
- Lishtvan, I (1987) Patent
Method of determining tendency of self-ignition of stored peat (rus.)
Patent USSR; SU 1296722 A1, date 870315,
- Lishtvan, I (1985)
Effect of iron on the self-ignition tendency of peat (rus.)
Vestsi Akad. Navuk Belarusi, Ser. Khim. Navuk, nr. 3, 94-96.
- Miao, Y. og Yoshizaki, S. (1994)
Mechanism of spontaneous heating of hay, Part 1 - Necessary conditions and heat generation
from chemical reactions.
- Milner, M., Cristensen, C.M. og Geddes, W.F. (1947)
Cereal Chem., 24, side 182.
- Musselman, H.H. (1935)
Bull. Mich. St. Univ. agric. Exp. Stn, 17, side 175.
- Kashinskaya, T et al. (1992)
Reactivity of peat in oxidative processes (rus.)
Khim. Tverd. Topl. (Moscow), nr. 5, 34-39.
- Koegel, R.G. og Bruhn, H.D. (1971)
Inherent causes of spontaneous ignition in silos, Transactions of the ASAE 14 (2), side 273-
276.
- Nelson, L.F. (1968)
Spontaneous heating, gross energie retention and nutrient retention of high-density alfalfa hay.
Transactions of the ASAE 11 (5), side 595-607.
- Povarkova, S.S. (1972)
Role of iron in the self-heating and self-ignition of peat (rus.)
Prevrashch. Torfa Ego Komponentov Protsesse Samorazogrevaniya, 248-251.

Pankratov et al. (1969)

Changes in the chemical composition of lowland peat during spontaneous heating. I
Temperature and gas conditions in piles of heated peat (rus.)
Vestsi Akad. Navuk Belarusi, Ser. Khim. Navuk, nr. 1, 83-87.

Ramstad, P.E. og Geddes, W.F. (1942)

Tech. Bull. Minn. agric. Exp. Stn, side 156.

Roethe, H. E. (1937)

Agric. Engng. St Joseph, Mich, side 547.

Rothbaum, H.P. (1963)

J. appl. Chem. , Lond., 13. side 291.

Tokari, T. og Takahashi (1986)

Charring of feedstuff and its prevention (på japansk)
Hay and Horriculture 34 (5), side 11-15.

Truninger, E. (1929)

Landw. Jbr. Schweiz., 43, side 278.

Working, E.B. (1942)

Science, N.Y., 96, side 281.