



European Train the Trainer Program for Responders

Leksjon 11

Hydrogen i lukkede rom

NIVÅ IV

Spesialist

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet **spesialister** og høyere nivåer.

Dette emnet er **KUN** tilgjengelig på NIVÅ IV

Denne leksjonen er en del av et opplæringsmaterieill med nivåer I–IV: Brannkonstabel, utrykningsleder, innsatsleder og spesialist. Les introduksjonen til leksjonen for forventet forkunnskap og læringsutbytte

Merk: Dette materialet tilhører HyResponder Consortium og skal krediteres deretter, resultatene fra HyResponse har blitt brukt som grunnlag



Ansvarsfraskrivelse

Til tross for at dette dokumentet er nøye utarbeidet, gjelder følgende ansvarsfraskrivelse: Informasjonen i dette dokumentet er gitt som den er, og det gis ingen garanti om at informasjonen er egnet for et bestemt formål. Brukeren av den tar i bruk informasjonen på egen risiko og ansvar.

Dokumentet gjenspeiler bare forfatterens syn. FCH JU og EU er ikke ansvarlig for bruk av informasjonen i det.

Takk

Prosjektet har fått finansiering fra Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) (now Clean Hydrogen Partnership) under bevilgningsavtale nr. 875089. JU mottar støtte fra EUs forsknings- og innovasjonsprogram Horizon 2020 samt fra Storbritannia, Frankrike, Østerrike, Belgia, Spania, Tyskland, Italia, Tsjekkia, Sveits og Norge.



Leksjon 11: Lukkede rom

Sammendrag

Denne leksjonen gir deg en oversikt over bruken av brenselcelle- og hydrogenteknologi i lukkede rom, for eksempel f.eks. innendørs, i parkeringshus og tunneler. Det understrekes at informasjonen som ble dekket i de foregående leksjonene er gjeldende, og derfor er bare nyere forskning tatt med her. Denne leksjonen tar opp de spesifikke farene knyttet til systemer med FCH som er plassert innendørs. Den tar opp de viktige temaene passiv og tvungen ventilasjon, godt ventilerte og underventilerte hydrogenbranner, inkludert to regimer for selvslukking og ytre flamme. Denne leksjonen tar også opp «pressure peaking phenomenon», som er spesifikt for hydrogen.

Stikkord

Lukkede rom, ventilasjon, pressure peaking phenomenon, parkeringsplasser, tunneler, godt ventilerte branner, underventilerte branner, selvslukkende flamme, ytre flamme.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	3
Stikkord.....	3
1. Målgruppe	5
1.1 Rollebeskrivelse: Spesialist	5
1.2 Kompetansenivå: Spesialist.....	5
1.3 Tidligere opplæring: Spesialist	5
2. Innledning og mål.....	6
3. Farer og tilhørende risiko ved bruk av hydrogen i lukkede rom.....	6
4. Permasjonslekkasjer.....	10
5. Innendørs utslipp og spredning av hydrogen	10
6. Naturlig og tvungen ventilasjon.....	12
7. Pressure peaking fenomenen.....	16
8. Parkeringsplasser.....	20
9. Tunneler.....	23
9.1 Effekt av ventilasjonshastighet på spredning i tunneler	24
9.2 Overgang fra deflagrasjon til detonasjon (DDT) i tunneler.....	25
10. Regimer for innendørs hydrogenbranner	27
10.1 Godt ventilerte branner	27
10.2 Underventilert brann	30
10.3 Selvslukkende flammemodus	31
10.4 Ytre flammemodus.....	35
11. Bruk av e-Laboratory	37
11.1 Passiv ventilasjon i en innkapsling med én ventilasjonsåpning: jevnt fordelt hydrogenkonsentrasjon	37
11.2 Pressure peaking fenomenen for uantente utslipp.....	42
11.3 Pressure peaking fenomenen for antent frigjøring.....	49
Takk.....	55
Referanser.....	56

Leksjon 11: Lukkede rom

1. Målgruppe

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet spesialister. Rollebeskrivelse, kompetansenivå og læringsutbytte for spesialist er beskrevet nedenfor.

1.1 Rollebeskrivelse: Spesialist

Spesialister bistår innsatsledere med råd og ved å lede og føre tilsyn med tekniske operasjoner som innebærer bruk av kunnskap, ferdigheter eller utstyr knyttet til en bestemt risiko- eller reaksjonsaktivitet. Typiske hendelser involverer farlige materialer, transportkjøretøy, klimarelaterte hendelser, strukturelle feil og andre feil på bygningsmiljøer samt beredskapslogistikk.

1.2 Kompetansenivå: Spesialist

Et vitenskapelig, teknisk og empirisk grunnlag innenfor fagområdet med tilhørende ferdigheter som er komplettert med egen erfaring, for å anvende denne informasjonen, kunnskapen på en fortolket og praktisk måte for å gjøre innsatsleder og andre i nødetatene som står under spesialistens ledelse i stand til å reagere effektivt og trygt på nødsituasjonen.

1.3 Tidligere opplæring: Spesialist

I henhold til det europeiske rammeverket for kvalifikasjon (EQF 5) er denne leksjonen tilegnet nivå 5: Omfattende, spesialisert, faglig og teoretisk kunnskap innenfor et arbeids- eller studiefelt og bevissthet om grensene for denne kunnskapen. Et omfattende utvalg av kognitive og praktiske ferdigheter som kreves for å utvikle kreative løsninger på abstrakte problemer. Øvingsledelse og veiledning i situasjoner med arbeid eller studieaktiviteter der det forekommer uforutsigbare endringer; gjennomgå og utvikle innsatsen for deg selv og andre.

2. Innledning og mål

Bruken av FCH-teknologi i lukkede rom er forbundet med en større sannsynlighet for hydrogenakkumulering. På grunn av fremveksten av disse teknologiene er det mulig å finne FCH-installasjoner ikke bare utendørs, men også innendørs. Eksempler på dette inkluderer: Gaffeltrucker i lagerbygg; kjøretøyer på parkeringsplasser, i tunneler og garasjer; elektrolysatorer og brenselceller til hjemmebruk osv. Ved en hendelse som involverer innendørs FCH-installasjoner, er følgende utvikling tenkelig: beboerne kan være ute av stand til å forlate bygningen/anlegget; nødetatene kan være ute av stand til å utføre sine plikter uten å sette sitt eget liv i fare; delvis eller fullstendig demolering setter livet i fare for både nødetatene og allmennheten. Derfor er temaet sikker bruk av hydrogen og brenselceller i lukkede rom av stor betydning for respondenter. Selv om oppdrift ved hydrogenutslipp utendørs er et naturlig sikkerhetsmoment som sikrer hurtig utslipp/spredning, er det ikke sikkert at det samme gjelder utslipp innendørs. Hurtige hydrogenutslipp innendørs kan enten føre til trykkoppbygging eller gassakkumulering og dermed til mer alvorlige konsekvenser.

UU var en av partnerne i det europeiske finansierte prosjektet Hyindoor “Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems” (www.hyindoor.eu). Hovedfunnene i dette prosjektet har gitt en dypere forståelse av fenomenene knyttet til utslipp fra hydrogeninstallasjoner innendørs og en veiledning om hydrogenbruk innendørs og i tunneler [1, 14].

På slutten av denne leksjonen skal du kunne følgende:

- Identifisere de viktigste farene ved bruk av hydrogen innendørs,
- Skille mellom passiv og tvungen ventilasjon,
- Beskrive hovedregimene ved innendørs hydrogenbranner,
- Forstå effekten av deflagrasjonsventilasjon,
- Forklare pressure peaking phenomenon,
- Bruk nomogrammer for å evaluere muligheten for pressure peaking phenomenon (PPP).

3. Farer og tilhørende risiko ved bruk av hydrogen i lukkede rom

Det finnes en rekke scenarioer som involverer FCH-applikasjoner i lukkede rom (se Deliverable D1.1 of HyResponder [2]). De totale volumene av innkapslingene kan variere, fra en liten garasje til en bokslignende innkapslingene for en stasjonær brenselcelle (FC), og opp til et stort lagerlokale. Hydrogenutslippshastigheter kan også variere, fra en liten massestrømningshastighet fra en tilførselsledning til en brenselcelle, til et stort utslipp fra høytrykkslagring, for eksempel frigjøring fra et TPRD i brenselcellebil som er parkert i en boliggarasje. Når hendelser eller ulykker skjer på FCH-systemer som befinner seg innendørs,

Leksjon 11: Lukkede rom

er prioriteringene for nødetatene å sikre menneskeliv og beskytte eiendom og miljø. Skadekriterier for mennesker og skadekriterier for bygninger og utstyr diskuteres i nærmere detalj i den aktuelle leksjonen.

Farene knyttet til en hendelse/ulykke på innendørs FCH -installasjoner omfatter:

- Oksygenmangel og påfølgende kvelning,
- Effekter av høy temperatur og varmefluks fra jetbranner,
- Frostskafer fra flytende hydrogenutslipp
- Overtrykkseffekter,
- Skade og tap av liv,
- Kollaps av strukturer,
- «Domino»-effekter,
- Skade på miljøet.

De som den prosjekterer/godkjenner/eier den innendørs FCH-installasjonen, bør nøye vurdere å redusere «skader på infrastrukturstrukturer og utstyr og minimere forstyrrelser i virksomheten, opprettholde virksomhetens image og redusere direkte og indirekte økonomiske tap» [3, 4]. «Det skal treffes tiltak for å hindre de eskalerende innvirkningene av skader knyttet til gjenstander, hendelser og innretninger og til eiendommens verdi og betydning i og rundt et anlegg» [3].

Ved et utslipp, enten det er stort eller lite, kan det oppstå en rekke fenomener. De kan omfatte:

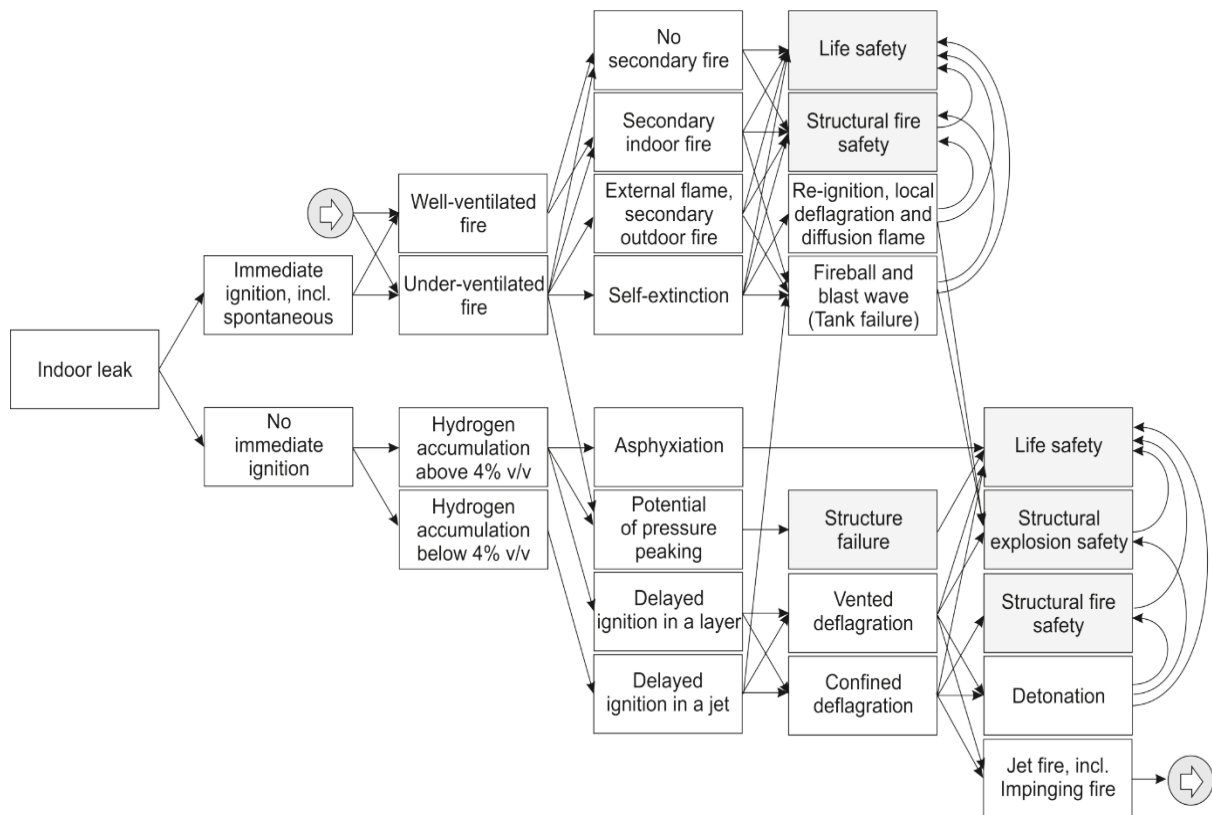
- Uantent hydrogenutslipp. Hvis dette inntreffer innendørs, er det flere problemer som må vurderes: evaluering av størrelsen på antennelighetsområdet; bestemmelse av nivået av potensielt overtrykk (uten antenning); vurdering av forholdet mellom ventilasjonshastighet og gassfrigjøring.
- Antent utslipp. Hvis et utslipp antennes og det dannes jetbrann, bør en rekke spørsmål vurderes, for eksempel: varmeoverføring til omgivelsene; bærekraften i en brann (dvs. er det tilstrekkelig med oksygen til å underbygge den eller vil den slukke); forholdet mellom ventilasjon og brannoppførsel; mulighet for ny antenning.
- Eksplosjon: Her bør man stille følgende spørsmål: hva blir konsekvensene hvis en uantent frigjøring akkumuleres og deretter antennes og resulterer i enten en deflagrasjon eller detonasjon? Hva er forholdet mellom ventilasjon og deflagrasjon av overtrykk?

Hydrogen har en høy tilbøyelighet til å lekke, og dette kan bli et problem i et innendørsmiljø. Hydrogenakkumulering i innkapslinger kan åpenbart føre til dannelse av en brennbar blanding med luft (eller oksygen). Det er også andre problemer knyttet til uønskede utslipp, for eksempel pressure peaking phenomenon (PPP) og effekten av oksygenmangel. Tilstrekkelig ventilasjon

Leksjon 11: Lukkede rom

kan redusere disse effektene. Hvis en hydrogenlekkasje antennes, vil brannen (jetbrann eller søyle) spre seg og vokse i en innkapsling. I tillegg til flammen og farene forbundet med den, for eksempel temperatur og varmefluks, vil det dannes gassformige varme forbrenningsprodukter som også kan utgjøre en fare. Når disse gassformige produktene stiger opp, kan det dannes et varmt sjikt av gasser under taket i innkapslingen. Måten brannen vokser på, avhenger av forbrenningstypen, samspillet med omgivelsene og tilgangen til oksygen [5]. Avhengig av størrelsen på lekkasjen og hvor den har oppstått, kan selve flammen påvirke konstruksjonselementene i innkapslingen.

Sikkerhetsrelaterte fenomener og potensielle konsekvenser forbundet med innendørs hendelser/ulykker med FCH-systemer er oppsummert i diagrammet i figur 1.



Figur 1. Sikkerhetsrelaterte fenomener og konsekvenser. Hvite bokser gjelder hydrogenfenomener; grå bokser gjelder konsekvensene [4].

Som vist i figur 1, finnes det to alternativer etter en hydrogenlekkasje i lukkede rom: ingen umiddelbar antenning (nedre gren av diagrammet) og umiddelbar antenning inkludert spontan antenning (diagrammet øverste gren). Antennelse av en hydrogenlekkasje kan skyldes tilstedeværelse av åpen ild, en het overflate, en elektrisk eller mekanisk gnist og andre faktorer, samt det hydrogenspesifikke fenomenet *spontan antenning* (i luftfylte rør) ved en såkalt diffusjonsmekanisme [6].

Hvis lekkasjen antennes umiddelbart, kan en etterfølgende brann utvikle seg i to moduser: *godt ventilert* og *underventilert*. *Godt ventilert brann* er preget av en relativt lav

Leksjon 11: Lukkede rom

hydrogenutslippshastighet og fullstendig forbrenning av hydrogen i innkapslingen. Farer forbundet med den godt ventilerte brannen omfatter:

- direkteeffekt fra flammen og varme forbrenningsprodukter,
- stråling fra det varme sjiktet som dannes under taket,
- varme, massive overflater som tak, konstruksjonssvikt i bærende elementer på grunn av direkte flammehemming osv.

En økning i hydrogenutslippshastigheten kan resultere i at det går over til *underventilert brann*, der oksygen forbrukes raskere enn det kan etterfylles gjennom ventilasjonen. Dette kan igjen føre til to underregimer: *en ytre flamme* som oppstår i ventilasjonsåpningene (uten forbrenning inne i innkapslingen) og fullstendig *selvslukking* av brannen i innkapslingen. De ytterligere tiltakene kreves av nødetatene etter selvslukking av brann, f.eks. i en brenselcellecontainer, for å sikre at hydrogen ikke akkumuleres over faregrensen i innkapslingen som rommer brenselcellen.

Begge typer brann kan føre til antennelse av brennbare materialer inne i skapet, og generere *sekundær innendørs brann*. Dermed vil brannen fortsette å brenne selv etter at hydrogenutslippet er stansen, f.eks. ved å stenge sikkerhetsventiler, og det kan oppstå tilleggfarer, for eksempel frigjøring av giftig røyk. Den underventilerte brannen er preget av relativt høy hydrogenutslippshastighet. Dermed er det risiko for PPP, som kan sette den strukturelle integriteten til innkapslingen [6, 7] i fare. Det er verdt å merke seg at både uantente og antente utslipp kan generere farlig overtrykk på grunn av PPP. Beregningen av overtrykk på grunn av PPP er imidlertid ulikt for uantente utslipp og jetbrann. Den underventilerte brannen kan også føre til en ytre flamme, dvs. *sekundær utendørs brann*.

Hvis begge typer branner, også sekundære branner, ikke slukkes og fortsetter å brenne, kan dette føre til en katastrofal svikt i innendørs lagertanker, noe som resulterer i en rask frigjøring av energi etterfulgt av antennelse av store mengder hydrogen, noe som produserer *ildkule* og *eksplosjonsbølge*. Ytre flamme og sekundære utendørs branner kan også føre til svikt i utvendige lagertanker. Derfor bør det iverksettes tiltak for å forhindre dette, f.eks. ved å plassere utvendige hydrogenbeholdere unna ventilasjonsåpningene.

Den selvslukkede, underventilerte brannen kan antennes igjen når frisk luft kommer inn i innkapslingen. Det kan potensielt føre til en *lokal deflagrasjon* og en diffusjonsflamme i sonene som inneholder hydrogen over den nedre brennbarhetsgrensen (LFL), dvs. 4 vol. %. Alle typer brann utgjør *risiko for liv og helse* (direkte termisk skade fra flammen, strålingsvarmeskade, overtrykk på grunn av PPP og giftige forbrenningsprodukter som produseres av sekundære branner) og *farer ved brann i strukturer* (svækkelse av den strukturelle integriteten og eventuell kollaps i innkapslingen på grunn av langvarige branner) [4].

Hvis en hydrogenlekkasje ikke antennes umiddelbart etter frigjøring, vil det føre til gradvis hydrogenakkumulering i innkapslingen. En frigjøring med høy strømningshastighet som

Leksjon 11: Lukkede rom

overstiger ventilasjonskapasiteten, kan produsere hydrogenkonsentrasjon over LFL, noe som skaper mulighet for *forsinket antennelse i et sjikt* og tilhørende deflagrasjon. I tillegg kan en frigjøring med høy strømningshastighet resultere i kvelning og PPP. Selv om hydrogen ikke er giftig, bidrar det ikke til stoffskiftet. I likhet med annen gass (med unntak av oksygen) foreligger risikoen for kvelning hovedsakelig i lukkede områder som følge av oksygenmangel [8]. Hydrogenutslipp med lavere hastighet, som ikke fører til akkumulering av hydrogen over 4 vol.-% i et sjikt, kan fortsatt resultere i *forsinket antennelse i en jetstråle*. Begge typer forsinket antennelse kan resultere i deflagrasjon av hydrogen-/luftblandingen med overtrykk, noe som potensielt kan ødelegge innkapslingen. Demping av eksplosjoner gjennom ventilasjon av deflagrasjon er en vanlig brukt teknikk. Når innkapslingen er utstyrt med ventilasjonsåpninger som letter på overtrykket ved deflagrasjon, kan det oppstå *ventilert deflagrasjon*. En *begrenset deflagrasjon* skiller seg fra den ventilerte deflagrasjonen ved at det ikke finnes større åpninger som leder ut til atmosfæren, slik at trykkavlastning i innkapslingen forhindres. Trykktoppen i en lukket beholder for en støkiometrisk hydrogen-/luftblanding som i utgangspunktet ligger på NTP, kan nå opptil 815 kPa [9], noe som vil ødelegge enhver ordinær bygningsstruktur (som generelt er i stand til å tåle overtrykk på omtrent 10-20 kPa).

I noen tilfeller kan deflagrasjon resultere i en overgang til *detonasjon*. På grunn av høyere flammespredningshastighet og høyere overtrykk, utgjør detonasjoner større fare sammenlignet med deflagrasjoner. Både hurtig forbrenning og detonasjon utgjør *risiko for liv og helse* på grunn av trykk og termiske effekter. De representerer også en *sikkerhetsrisiko for strukturell eksplosjon*, som i verste fall fører til at innkapslingen kollapser. Endelig kan begge forsinkede antenneshendelser som er diskutert tidligere være forbundet med jetbranner, inkludert brannpåvirkning på vegger og/eller tak i innkapslingen. Når jetbrannen er etablert, kan den brenne i enten et godt ventilert eller underventilert regime, og de påfølgende fenomenene og sikkerhetskonskvensene vil følge mønsteret som er angitt i den øvre grenen av diagrammet (figur 1) som tilsvarer umiddelbar tenning som vist med pilen (☉) i sirkelpiktogrammet.

4. Permasjonslekkasjer

Permeasjon av hydrogen gjennom lagertanker anses ikke som et problem for nødetatene. For å gi en fullstendig oversikt er imidlertid fenomenene beskrevet i leksjon 3 - Hydrogenlagring, leksjon 4 - Hydrogens kompatibilitet med forskjellige materialer og leksjon 6 - Utslipp av uantent hydrogen utendørs og skadebegrensning

5. Innendørs utslipp og spredning av hydrogen

Applikasjoner basert på hydrogenenergi krever ofte at systemene brukes innendørs, f.eks. trucker for materialhåndtering i et lageranlegg, brenselceller i et innendørs rom, eller hydrogen lagret og distribuert fra et gasskabinett. Det kan også være nødvendig eller ønskelig å finne systemkomponenter/-utstyr i hydrogensystemet i innendørs eller utendørs skap av sikkerhetsmessige årsaker, med sikte på å isolere dem fra sluttbrukeren og allmennheten.

Leksjon 11: Lukkede rom

Bruk av hydrogen i lukkede miljøer krever detaljerte vurderinger av farer og tilhørende risiko, inkludert potensielle risikoforebyggende og -begrensende funksjoner. Frigjøring av hydrogen kan potensielt føre til akkumulering av hydrogen og dannelse av en brennbar hydrogen-/luftblanding, noe som kan resultere i jetbranner.

Kunnskapshullene i de følgende fire hovedemnene ble lukket gjennom HyIndoor-prosjektet (<https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>).

- Hydrogenutslipp i et lukket eller delvis lukket rom;
- Hydrogen-/luftdeflagrasjon innendørs;
- Jetbrann og underventilert brann;
- Hydrogendeteksjon i lukkede rom.

Den oppsamlede kunnskapen er omgjort til oppdaterte sikkerhetsretningslinjer, inkludert konkrete tekniske verktøy som understøtter implementeringen av dem. Det er formulert anbefalinger med hensyn til utviklingen som kreves i regelverk og standarder på europeisk og internasjonalt nivå for å understøtte sikker introduksjon av brenselceller og hydrogen på tidlige markeder.

Det finnes tre generelle sikkerhetsmål for ethvert sikkerhetssystem, inkludert bruk av hydrogensystemer innendørs: sikkerhet for liv og helse, beskyttelse av eiendom og miljøvern. Sikkerhet for liv og helse er den viktigste faktoren, f.eks. for arbeidere på stedet, kunder og allmennheten. Målene ved sikkerhet for liv og helse inkluderer blant annet[3] :

- Beboere/ansatte kan forlate bygningen/anlegget i rimelig tid, eller konsekvensene for beboere/ansatte er akseptabelt lave;
- Nødetatene er i stand til å operere med rimelig sikkerhet;
- Kollaps eller strukturrester setter ikke tilskuere, nødetatene og andre som befinner seg i nærheten, i fare.

De generelle sikkerhetsreglene, strategiene og anbefalingene for prosjektering og bruk av hydrogeninfrastruktur inkluderer:

- Vurder om det virkelig er nødvendig å plassere hydrogensystemet i et rom/innkapsling, eller om det kan flyttes utendørs der utilsiktet lekkasje med mindre sannsynlighet vill føre til akkumulering av hydrogen i brennbare konsentrasjoner på grunn av bedre ventilasjon;
- Reduser diameteren på hydrogentilførselsrøret og driftstrykket til det minimum som kreves for å oppfylle tekniske krav til massestrømningshastighet. Bruk strømningsbegrensere hvis reduksjon av rørdiameter er umulig eller uønsket;
- Minimer hydrogentrykket når det er mulig;
- Observer hydrogeninfrastrukturen på en måte som sikrer demping av varmestråle rammes før den treffer nærstående hindringer for å forhindre dannelse av sjikt med brennbar hydrogenkonsentrasjon;

Leksjon 11: Lukkede rom

- Identifikasjon og, hvor mulig, reduksjon av antall og separasjon av potensielle antennelseskilder;
- Bruk av lagertanker med høy brannmotstandsgrad for å sikre tilstrekkelig tid til evakuering av mennesker;
- Minimering av hydrogenbeholdning for å forhindre dannelse av brennbar blanding i lukkede rom selv etter hydrogen er fullstendig frigjort og spredt, eller begrense hydrogen til under en mengde som vil forårsake strukturelle skader på utsatt utstyr og bygninger ved deflagrasjon;
- Evaluering av deterministiske separasjonsavstander før kvantitativ risikovurdering (QRA). Deterministiske separasjonsavstander kan beregnes for uantente utslipp og for godt ventilerte jetbranner ved bruk av publiserte og validerte nomogrammer;
- Vurder å bruke ventilasjon på sidene, fortrinnsvis fremfor takventiler for å forbedre passiv ventilasjon og vertikale kontra horisontale åpninger i samme område;
- Vurder å bruke flere ventilasjonsåpninger fremfor én enkelt ventilasjonsåpning i samme område der høydeforskjellen mellom ventilasjonsåpningene er så stor som mulig og ventilasjonen er plassert på alle sider av bygningen for å forbedre ventilasjon med vind, uansett vindretning;
- Vurder å minimere bruk av ventilasjonsrør og -kanaler.

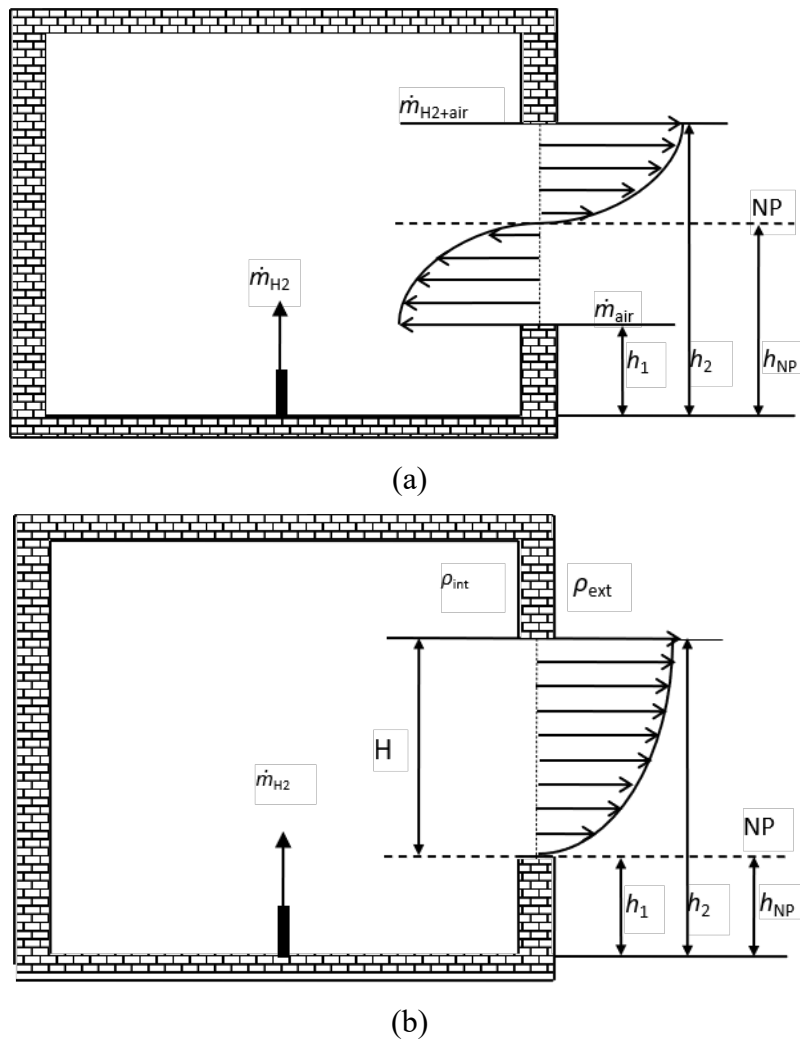
Retningslinjene og avbøtingsstrategiene for innendørs hydrogenbruk er å finne i sluttrapporten fra HyIndoor-prosjektet (<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02429488>).

6. Naturlig og tvungen ventilasjon

Ventilasjon kan være *naturlig/passiv* eller *tvungen/mekanisk/aktiv*. Naturlig ventilasjon er et foretrukket alternativ, ettersom det er billig og pålitelig, det er ikke avhengig av strømkilde og er alltid i drift. Naturlig ventilasjon oppnås gjennom permanente ventilasjonsåpninger. Plasseringen av disse ventilasjonsåpningene er viktig og må sikre maksimal luftstrøm og spredning av den brennbare gassen. Med hydrogen anbefales en kombinasjon av høyt og lavt plasserte ventilasjonsåpninger. Hvis det kan verifiseres, bør naturlig ventilasjon forestå all nødvendig ventilasjon og erstatningsluft.

Nøytralplanet (NP) er et horisontalt plan der trykket i og utenfor innkapslingen er likt. Under NP strømmer luften inn i innkapslingen og over NP strømmer lettere hydrogen-/luftblanding ut av innkapslingen. Ved naturlig ventilasjon er NP på det halve av ventilasjonshøyden (figur 2a). Ved passiv ventilasjon av innkapslingen med frigjøring av gass som er lettere enn luft, er NP plassert på eller under det halve av ventilasjonshøyden for stasjonære forhold som vist i figur 2b.

Leksjon 11: Lukkede rom



Figur 2. Strømningshastighet gjennom naturlig (a) og passiv (b) ventilasjon.

Ligninger for naturlig luftventilasjon er avledet ut fra forutsetningen om lik strømning inn og ut av innkapslingen. Ved passiv ventilasjon kan NP for gasser lettere enn luft være hvor som helst under halvparten av ventilasjonshøyden.

Maksimal hydrogenkonsentrasjon i innkapslingen med én ventilasjonsåpning ut fra en forutsetning om vedvarende lekkasje kan evalueres ved hjelp av følgende ligning [10]:

$$X = f(X) \cdot \left[\frac{Q_0}{C_D A (g' H)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

hvor X er hydrogenvolumfraksjonen, Q_0 er utslippshastigheten (m^3/s), C_D er utslippskoeffisienten, A er ventilasjonsområdet (m^2), H er ventilasjonshøyden (m), g er redusert tyngdekraften (m/s^2), $g' = g(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{H}_2})/\rho_{\text{air}}$, ρ_{air} og ρ_{H_2} er tettheten til henholdsvis luft og hydrogen (kg/m^3) og $f(X)$ er funksjonen lik:

Leksjon 11: Lukkede rom

$$f(X) = \left(\frac{9}{8}\right)^{1/3} \cdot \left\{ \left[1 - X \left(1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{air}} \right) \right]^{1/3} + (1 - X)^{2/3} \right\} \quad (2)$$

Ligning (1) er avledet ut fra forutsetningen om at:

- utslippshastigheten forblir konstant,
- gassblandingen er jevnt fordelt over innkapslingen, dvs. at hydrogenkonsentrasjon ikke er en funksjon av lokaliseringen i innkapslingen.

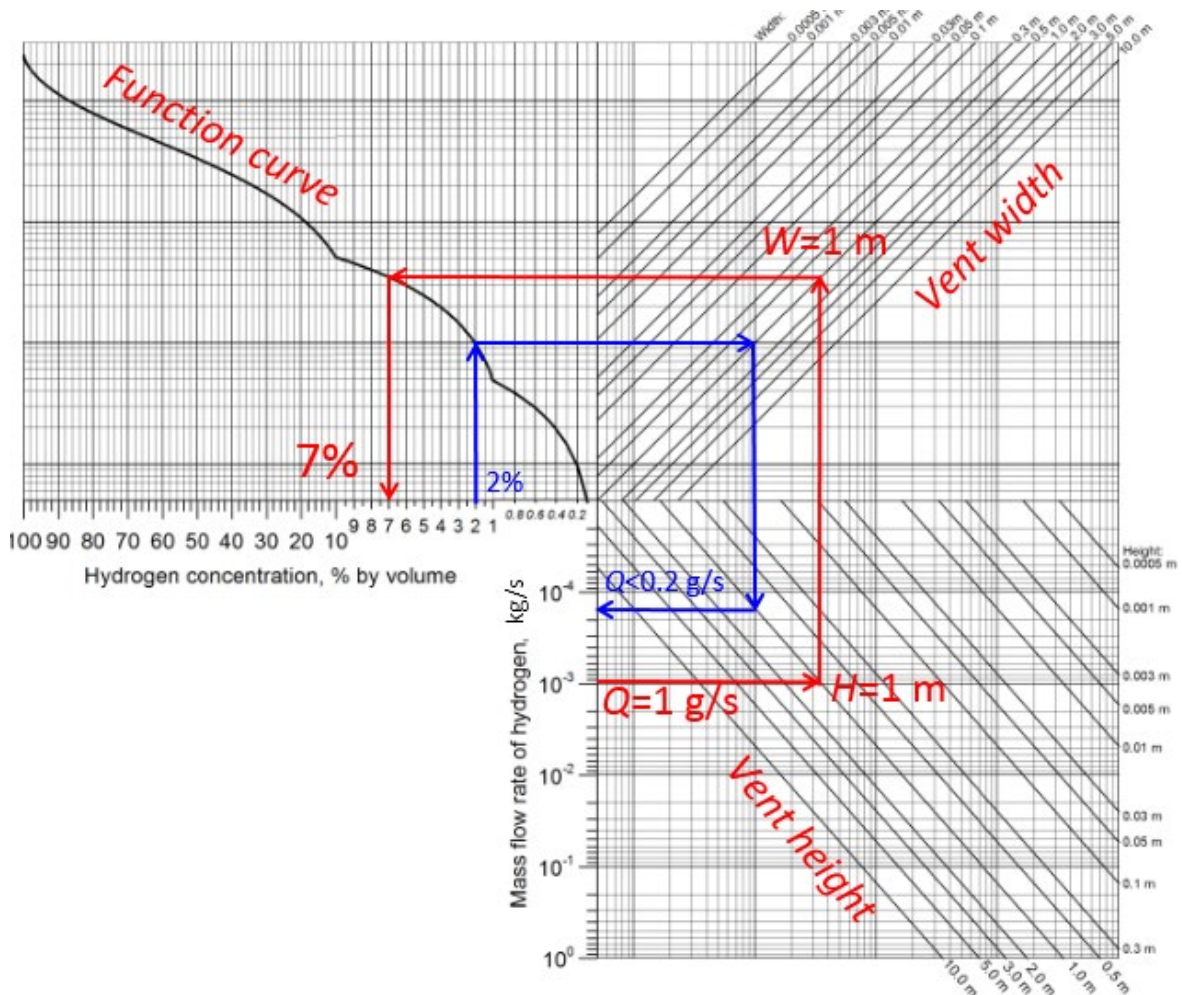
En sammenligning med eksperimenter har imidlertid vist at ligningen (1) kan brukes til å forutsi maksimal hydrogenkonsentrasjon når det gjelder hydrogendannende sjikt [10], dvs. den kan betraktes som konservativ. Basert på ligninger av (1) og (2) ble det utviklet et teknisk nomogram for beregning av størrelser (høyde og bredde) på en ventilasjonsåpning i tilfellet med en ensartet blanding i innkapslingen og én enkelt ventilasjonsåpning [10] (figur 3). Vær oppmerksom på at selv om hydrogen-/luftblanding i praksis kan danne sjikt selv i innkapslinger med én ventilasjonsåpning, vil ligninger og nomogrammet i figur 3 gi resultater nær maksimal konsentrasjon, det vil si at den er konservativ og kan brukes på ujevnt fordelte blandinger. Nomogrammet kan brukes til å beregne maksimal hydrogenkonsentrasjon ved stasjonær tilstand ved kjent høyde og bredde på ventilasjonsåpning og utslippshastighet. Nomogrammet er gyldig for både ensartede og ujevne blandinger i en innkapsling med én ventilasjonsåpning. Fremgangsmåten for beregning av hydrogenkonsentrasjon (røde piler) er som følger:

1. Velg massestrømningshastigheten for hydrogenlekkasje ved den vertikale akse til det nedre panelet på nomogrammet og projiser det horisontalt til skjæringspunktet med en av de diagonale linjene som tilsvarer forskjellige ventilasjonshøyder. Det finnes 15 slike linjer i nomogrammet i figur 3, som dekker praktisk talt alle mulige ventilasjonshøyder fra 0,5 mm til 10 m.
2. Fra skjæringspunktet tegner du en vertikal linje opp til den krysser en av de diagonale linjene øverst til høyre på nomogrammet, som tilsvarer forskjellige ventilasjonsbredder. Det finnes 15 slike linjer i nomogrammet i figur 3, som dekker ventilasjonsbredder i området mellom 0,5 mm og 10 m.
3. Fra skjæringspunktet tegner du en horisontal linje til venstre frem til skjæringspunktet med funksjonskurven i panelet øverst til venstre på nomogrammet.
4. Tegn en vertikal linje fra skjæringspunktet frem til den horisontale akse på det øverste venstre panelet. Verdien på den horisontale akse tilsvarer hydrogenkonsentrasjonen i vol.-%.

Nomogrammet i figur 3 kan også brukes for den motsatte evalueringen, dvs. for beregning av ventilasjonsstørrelsen som kreves for å sikre at konsentrasjonen for den gitte hydrogenutslippshastigheten ikke vil overstige en spesifisert verdi (blå piler i figur 3). I dette tilfellet utføres beregningsprosessen i motsatt rekkefølge og starter med den ønskede

Leksjon 11: Lukkede rom

konsentrasjonsverdien (se eksempel med 2 vol.-% blanding i figur 3). Hvis det er nødvendig å evaluere dimensjonene til ventilasjonen, som vil gi hydrogenvolumprosent under et visst nivå, f.eks. under 2 vol.-% (blå piler) vil man starte med ønsket volumprosentverdi ved den horisontale akse i det øvre venstre panelet og tegne en vertikal linje frem til skjæringspunktet med funksjonskurven i dette panelet. Fra dette skjæringspunktet kan man tegne en horisontal linje til høyre mot øvre høyre panel, over kurvene for ventilasjonsbredden. Deretter bør man velge masseutslippshastighet (f.eks. 0,2 g/s) i det nedre venstre panelet på nomogrammet, og trekke den horisontale linjen til høyre over det nedre høyre panelet gjennom kurvene for ventilasjonshøyde. Det er nå mulig å bestemme dimensjonene til ventilasjonen som er nødvendig for innkapslingen for å gi en hydrogenkonsentrasjon som ikke overstiger 2 vol.-% for et spesifisert hydrogenutslipp. For å holde hydrogenkonsentrasjonen under 2 vol.-% med den angitte utslippshastigheten 0,2 g/s i eksemplet vist i figur 3, skal innkapslingen være utstyrt med ventilasjon 1 m i høyden og 1 m i bredden.



Figur 3. Et teknisk nomogram for beregning av maksimal verdi av stasjonær konsentrasjon av hydrogen i innkapslingen med én ventilasjonsåpning (utslippskoeffisient $C = 0,6$) .

7. Pressure peaking phenomenon

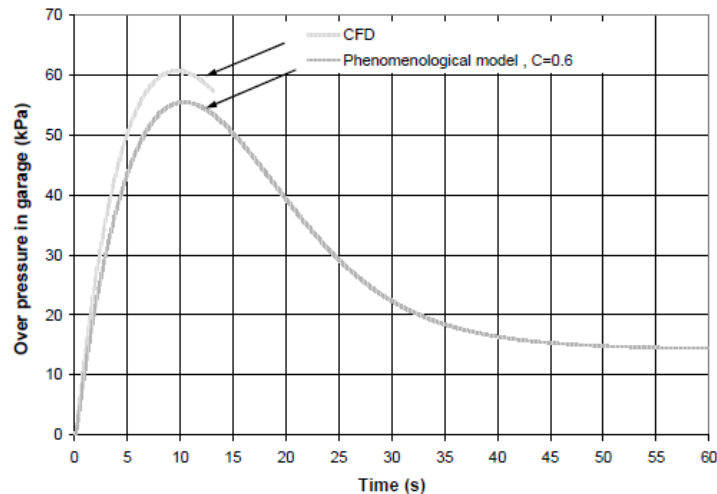
Pressure peaking phenomenon observeres for gassene som er svært lette (lettere enn luft), noe som kan resultere i overtrykk som overskrider grensen for strukturell styrke for et lukket rom eller en bygning ved tilstrekkelig høy hydrogenutslippshastighet. Pressure peaking phenomenon vil oppstå hvis hydrogenutslippshastigheten er høy nok til å resultere i fullstendig fortrengning av luft fra rommet, dvs. at hydrogenkonsentrasjonen i rommet må nå 100 vol. %.

Det er kjent at i kjøretøyer med brenselceller vanligvis lagrer hydrogen som komprimert gass i tanker som er utstyrt med termisk aktiverte trykkavlastningsinnretninger (TPRD) i henhold til EU kommisjonens forordning nr. 406/2010 [17]. PRD monteres på drivstofftanken og begynner å frigjøre hydrogen når temperaturen på ca. 110 °C er nådd, f.eks. ved brann. TPRD kan bevirke en rask frigjøring av hydrogen hvis det brukes en stor åpningsdiameter, noe som minimerer muligheten for tankeeksplosjon under for lang eksponering for brann. Høye massestrømninger fra TPRD er sannsynligvis «akseptable» for utendørs bruk. Imidlertid er farene som følge av en rask frigjøring innendørs annerledes.

La oss tenke oss et hypotetisk scenario som involverer utslipp fra en typisk hydrogentank på 35 MPa ombord i et kjøretøy, gjennom en åpning på 5,08 mm [18]. Utslipet antas å skje vertikalt oppover i midten, 0,5 m over gulvet, i en liten garasje med størrelse $L \times B \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m [19] og volum på 30,4 m³ med én enkelt ventilasjonsåpning som tilsvarer arealet til en vanlig murstein, $L \times H = 25 \times 5$ cm plassert i flukt med taket. Det er gjort en konservativ tilnærming, det vil si at det anvendes en konstant massestrømningshastighet på 0,39 kg/s (og trykkfall i lagertanken ignoreres) etter åpningen av TPRD. Dermed vurderes et verstefallsscenario, dvs. høy massestrømningshastighet i en liten garasje med minimal ventilasjon.

Anvendelsen av matematiske modeller for stasjonær subsonisk frigjøring (når hydrogen fyller innkapslingen fullt ut) gir de forutsagte overtrykksverdiene i innkapslingen i området mellom 15 (som følge av Bernoullis ligning med nullhastighet i beholderen) og 17,9 kPa (fra ligningen for blendemåling for subsonisk strøm) for en utslippskoeffisient C i begge tilfeller brukt slik det er vanlig anbefalt, $C = 0,6$ [20]. Disse estimatene utgjør imidlertid ikke den første innsprøytningshastigheten for en lettere gass (hydrogen) i en tyngre gass (luft). Den forutsagte transiente trykkbelastningen i den ventilerte innkapslingen er oppgitt i figur 4.

Leksjon 11: Lukkede rom



Figur 4. Predikert overtrykk i garasjen over tid, en sammenligning mellom CFD og en fenomenologisk modell [18].

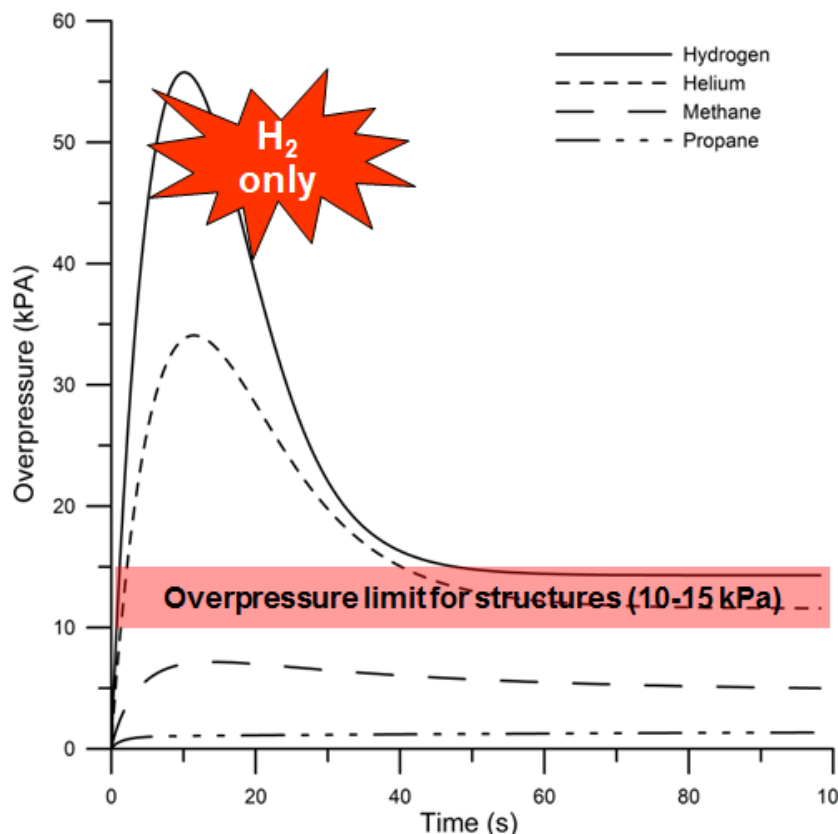
Figur 4 viser hvordan overtrykket i innkapslingen som følge av innsprøyting av hydrogen når et nivå som er i stand til å demolere garasjen [9] på bare 3 sekunder for det valgte scenarioet. Som det følger av figur 4: Hvis garasjen ikke først blir ødelagt, vil trykket i garasjen for dette scenarioet nå et maksimumsnivå på over 60 kPa. Trykket faller deretter og har en tendens til en stasjonær verdi som er betydelig lavere og lik den som forutsies av de enkle estimatene for stasjonær tilstand. Vær nok en gang oppmerksom på at dette representerer et verst tenkelig scenario med en konstant massestrømningshastighet. Derfor er fortsettelsen på en konstant massestrømningshastighet i 60 sekunder tatt med i figur 4 for illustrasjonsformål, for å vise tidsrammen før stasjonære forhold oppnås når praktisk talt hele garasjen er fylt med 100 vol.-% hydrogen. Legg også merke til hvordan maksimalt trykk oppnås på mindre enn 10 sek. I løpet av denne tiden vil hele garasjen bli demolert, uten engang ta konsekvensene av antennelse i betraktning.

Det skal bemerkes at overtrykksnivået som er nådd inne i garasjen øker med reduksjonen av molekylmassen til gassen som sprøytes inn i garasjen, dvs. lettere gass som hydrogen resulterer i et betydelig høyere trykk enn en tyngre gass, f.eks. propan. Dette bør tas i betraktning ved utforming av TPRD-er for bruk med hydrogen, det vil si at den samme teknologien som brukes for f.eks. CNG ikke må antas å oppføre seg på samme måte for hydrogen.

Figur 5 viser de forutsagte overtrykksverdiene kontra tid for en rekke gasser med samme massestrømningshastighet (0,39 kg/s) i samme garasjelignende innkapsling (volum 30,4 m³, ventilasjonsåpning 0,0125 m²). Utslippskoeffisient C = 0,6. Molekylmassene av hydrogen, helium, metan og propan er henholdsvis 0,002, 0,004, 0,016 og 0,044 kg/mol. Det er klart at overtrykkstoppen synker med gassens økende molekylmasse. Jo høyere molekylmasse gassen har jo nærmere ligger maksimaltrykket stasjonære verdier som kan forutsies ved bruk av enkle metoder. Den volumetriske strømningshastigheten ut av innkapslingen er omvendt proporsjonal med kvadratroten av gasstettheten som slipper ut av innkapslingen. I begynnelsen

Leksjon 11: Lukkede rom

av prosessen, når tettheten i hydrogen-/luftblandingen er svært høy og nær luftens tetthet, er den konstante volumetriske tilstrømningen av rent hydrogen derfor vesentlig høyere enn den volumetriske utstrømningen av den tyngre hydrogen-/luftblandingen, og dette forklarer hvorfor overtrykket for lettere innkommende gass vokser til et høyere nivå sammenlignet med for en tyngre innkommende gass og trykkdynamikken bare har en karakteristisk toppverdi for hydrogen.

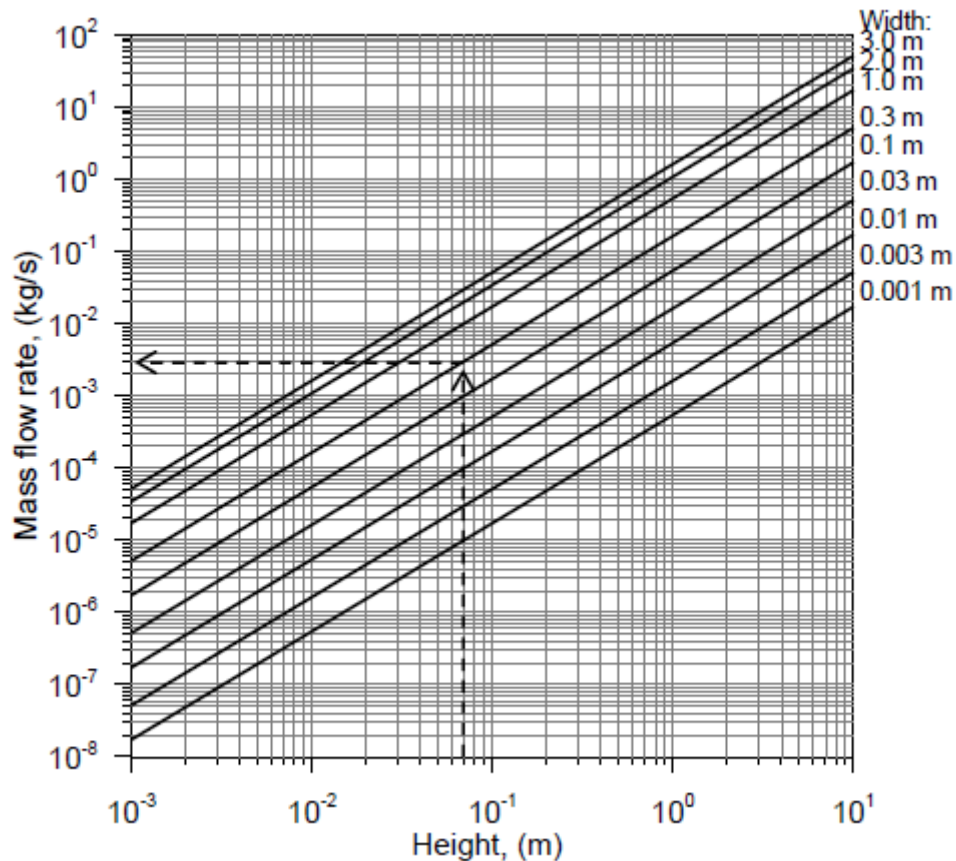


Figur 5. Predikerte overtrykksverdier for hydrogen, helium, metan og propan frigjort i en garasje over tid, utslippshastighet på 0,39 kg/s [18].

Pressure peaking phenomenon oppstår bare når hydrogenutslippshastigheten er høynok fullstendig å fortrenge luft fra rommet innenfor tidsrommet for en vedvarende lekkasje. Før estimering av overtrykk generert av PPP er det derfor nødvendig å bekrefte om utslippshastigheten er tilstrekkelig til å fylle innkapslingen med 100 % hydrogen hvis det oppstår en lekkasje. Et teknisk nomogram i figur 6 kan brukes for å verifisere dette [10]. Med nomogrammet kan man beregne de maksimale ventilasjonsdimensjonene som for et gitt, ensartet utslipp til slutt vil resultere i en hydrogenkonsentrasjon på 100 vol.-% i innkapslingen. For å finne de maksimale ventilasjonsdimensjonene velger du hydrogenutslippshastighet på den vertikale akse og trekker en horisontal linje til skjæringspunktet med en av de diagonale linjene som tilsvarer en passende ventilasjonsbredde. Tegn en vertikal linje fra skjæringspunktet til den horisontale akse for å finne nødvendig ventilasjonshøyde. Alternativt kan nomogrammet i figur 6 brukes til å finne den minimale utslippshastigheten for en kjent

Leksjon 11: Lukkede rom

ventilasjonsstørrelse når beregning av PPP er nødvendig, og i så fall reverseres trinnene ovenfor. Hvis utslippshastigheten som er funnet gjennom dette nomogrammet, er lavere enn den faktiske, eller de faktiske ventilasjonsdimensjonene er mindre enn det som fremkommer ved bruk av nomogrammet i figur 6, vil 100 vol.-% hydrogenkonsentrasjon nås og PPP kan forekomme, og nomogrammet for PPP (figur 7) bør brukes.



Figur 6. Nomogrammet for grafisk evaluering av massestrømningshastigheten for hydrogenlekkasje i en innkapsling med én ventilasjonsåpning, som fører til 100 vol.-% av hydrogenkonsentrasjon [10].

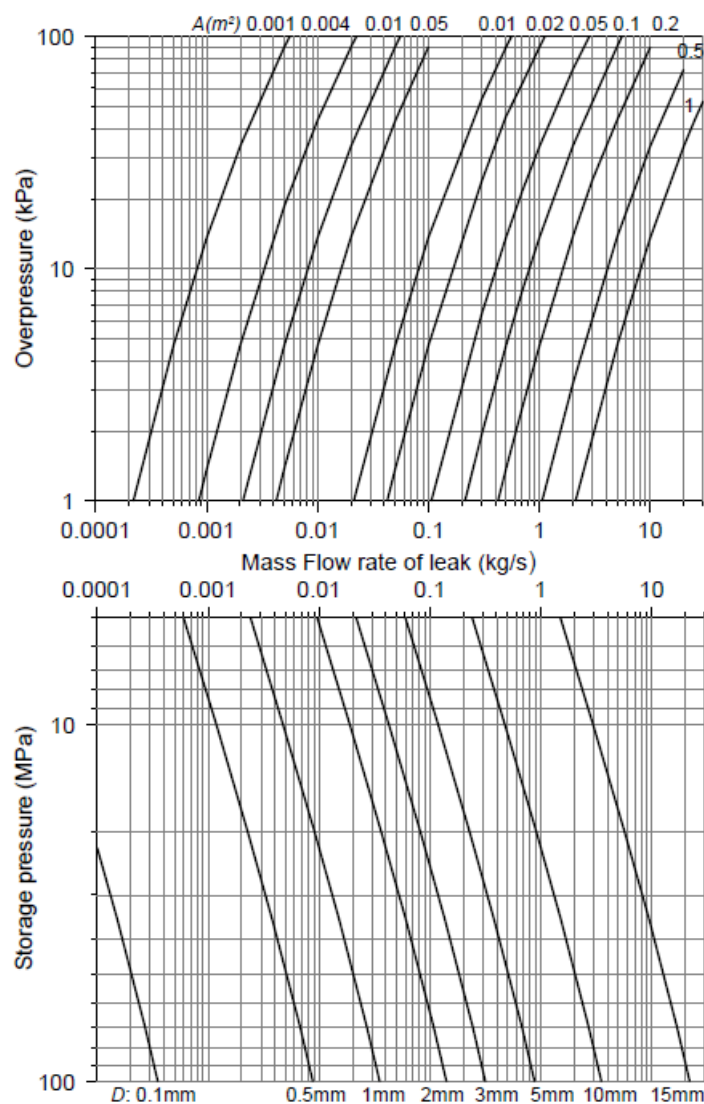
Figur 7 viser et nomogram for PPP-evaluering, som gjør det mulig å beregne maksimal overtrykkstopp produsert ved hydrogenutslipp i høy hastighet med kjent massestrømningshastighet og lekkasjediameter. Følg denne fremgangsmåten for å bruke nomogrammet i figur 7:

- Start med den vertikale aksene på grafens nedre panel og velg lagringstrykk, avles lekkasjediameteren ved å avlese horisontalt.
- Les vertikalt oppover for å beregne massestrømningshastigheten til lekkasjen. Fortsett vertikalt oppover fra massestrømningshastigheten til skjæringspunktet med linjen for å finne det passende ventilasjonsområdet i det øvre panelet.

Leksjon 11: Lukkede rom

- Les horisontalt mot venstre til skjæringspunktet med den vertikale akse. Skjæringspunktet angir maksimalt overtrykk i innkapslingen.

Alternativt kan nomogrammet i figur 7 brukes til å bestemme ventilasjonsområdet som kreves for å holde overtrykket under den angitte grensen. I dette tilfellet følger du de to første trinnene og tegner deretter en horisontal linje fra ønsket overtrykksverdi på den vertikale akse i det øvre panelet i grafen. Det som ligger nærmest skjæringspunktet i det øvre panelet vil tilsvare det nødvendige ventilasjonsområdet (hvis krysset faller mellom to kurver, bruker du krysset lengst til høyre for å få en konservativ verdi).



Figur 7. Nomogram for pressure peaking fenomenon for forskjellige utslippshastigheter [4].

8. Parkeringsplasser

Parkeringsplasser, enten det er parkeringskjellere, åpne eller overdekket, er svært viktig for det økende antallet hydrogendrevne kjøretøyer som brukes verden over. Det blir viktig å vurdere praktiske scenarioer og problemer som kan oppstå ved daglig bruk av slike kjøretøyer. Ved å

Leksjon 11: Lukkede rom

forstå farene som oppstår på grunn av plasseringen av hydrogendrevne kjøretøyer i lukkede miljøer, kan det treffes tiltak for reduksjon av tilhørende farer og risiko gjennom en iboende tryggere design. I de fleste personbiler lagres hydrogen vanligvis som komprimert gass i tanker. Typiske lagringstrykk ligger i området 350 til 700 bar. Mengden hydrogen varierer etter størrelsen på kjøretøyet, og ifølge det amerikanske energidepartementet er det nødvendig med hydrogenlager om bord i området 5-13 kg for å oppnå en rekkevidde på mer enn 500 km for hele plattformen av lette kjøretøyer som bruker brenselcellesystemer [26].

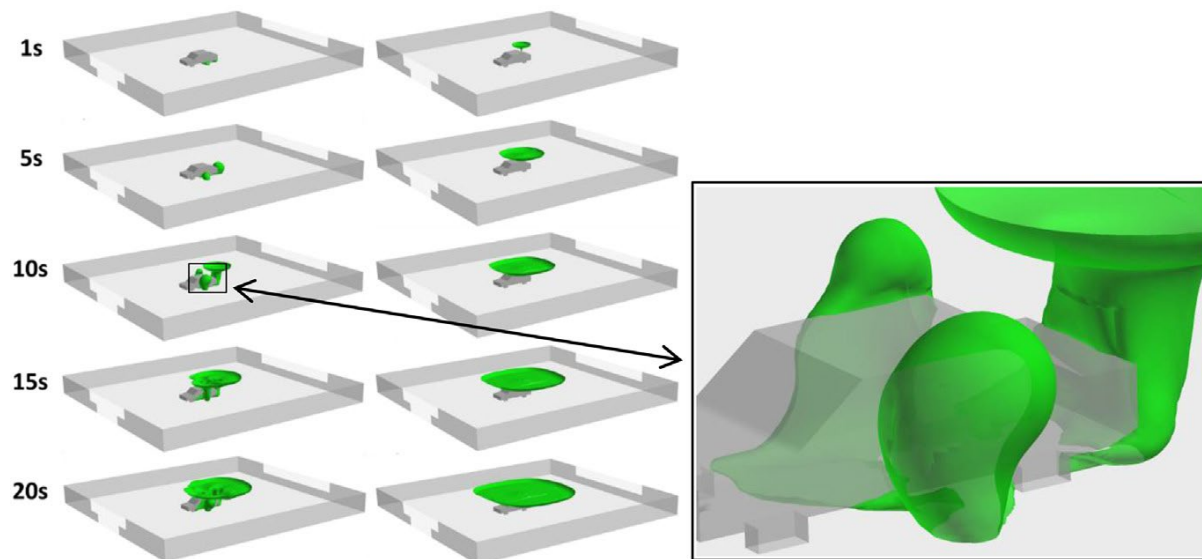
Hydrogenlagertanker ombord i kjøretøy er vanligvis utstyrt med trykkavlastningsenheter (TPRD). Disse sørger for rask frigjøring av hydrogen for å minimere muligheten for katastrofal svikt i tanken når den er eksponert for brann. Ved et utilsiktet hydrogenutslipp er sannsynligvis høye massestrømninger fra TPRD akseptabelt utendørs, ettersom hydrogenets oppdrift er gunstig for å bidra til spredning under LFL. Imidlertid kan en hurtig frigjøring innendørs gi akkumulering og dannelse av en brannfarlig hydrogen-/luftblanding. Fra et sikkerhetsperspektiv oppstår det en rekke farer etter et utslipp med høy frigjøringshastighet. Pressure peaking fenomenon i et scenario med en typisk TPRD (diameter på 5,08 mm) med liten ventilasjon ble beskrevet og forklart [27]. Det ble funnet at overtrykket ved en konstant hydrogenutslippshastighet på 0,39 kg/s i en 30,4 m³ garasje med en enkelt ventilasjonsåpning på størrelse med en murstein raskt (2 sek) kunne nå et nivå på 10-20 kPa, noe som er i stand til å forårsake store skader og mulig kollaps, avhengig av konstruksjonens art og impulsens varighet. Ved hydrogenutslipp resulterer hydrogenets høye volumetriske strømningshastighet i betydelig overtrykk selv uten forbrenning. Det ble vist at trykket i garasjen når et maksimalt nivå over 50 kPa for en 350 bar lagringstank og 100 kPa for 700 bar. Dette maksimale trykket faller deretter og tenderer mot en stabil verdi, en størrelsesorden lavere og lik den som forutsies av de enkle estimatene for stabile verdier [27].

Analysen ovenfor indikerer at den «typiske» TPRD -diameteren på 5,08 mm kanskje ikke er «trygg» for innkapslinger, f.eks. parkeringshus med begrenset ventilasjon. Derfor ble trykkdynamikken i garasjelignende rom undersøkt for å skjerme den optimale TPRD-diameteren basert på teorien om underekspanderte jetstrømmer og en tømmingsmodell i Ulster [28]. Det ble utført en studie for å undersøke forholdet mellom TPRD-diameter, luftskift per time (ACH) og mengde utslipp i innkapslinger med én enkelt ventilasjonsåpning fra lagringstanker ombord i kjøretøy på 1, 5 og 13 kg ved 350 og 700 bar. Den «sikre» diameteren ble bestemt som den TPRD-diameteren som ikke ville resultere i et overtrykk på over 20 kPa i en garasje under en lekkasje. Den dynamiske trykkstigningen, som er unik for frigjøring av hydrogen i en ventilt innkapsling, bør tas i betraktning når man utfører sikkerhetstekniske tiltak for hydrogen for innendørs bruk. Studiet av trykkdynamikk for 5 kg hydrogen lagret i en 350 bars tank i en 30 m³ garasje med ACH på 0,18 indikerte at man med en reduksjon i TPRD-diameter fra 5 til 0,55 mm effektivt kunne unngå pressure peaking fenomenon i garasjen. Det gikk tydelig frem at de nåværende ordningene for TPRD-er, som mangler brannmotstand ved lagring ombord, genererer en uakseptabel ytelse av systemer i innkapslinger hvis TPRD -ene

Leksjon 11: Lukkede rom

aktiveres selv med et uantent utslipp. Dermed stiller en forenklet «redesign» av TPRD-ene for å beskytte garasjestrukturen mot kollaps krav til brannmotstand på opptil flere timer, noe som knapt nok er realiserbart. Det trengs ytterligere forskning for å utvikle sikkerhetsstrategier og tekniske løsninger for å håndtere problemet med brannmotstand i innbygde lagertanker og krav til TPRD-ytelse.

Nylig ble de uantente hydrogenutslippene fra kjøretøyets lagertank på en naturlig ventilert overbygd parkeringsplass studert i UU [29]. Denne nye studien presenterer funn som er relevante for kjøretøyprodusenter, standardutviklingsorganisasjoner (SDO) og det bredere bygningsmiljøet. Den numeriske modellen som ble utviklet, ble validert mot eksperimentelle data fra KIT (Tyskland) for en heliumrammet jetstråle, og det ble funnet et tilfredsstillende numerisk og eksperimentelt samsvar innenfor en akseptabel teknisk feilmargin. Det ble utført simuleringer for en parkeringsplass med dimensjoner på $30 \times 28.6 \times 2,6 \text{ m}^3$ i henhold til britisk standard BS 7346-7: 2013. Elleve tilfeller av utslipp fra 700 bar lagring ble vurdert, inkludert fire utslipp oppover fra et rør på 0,5 m over gulvet, og ett oppover og seks utslipp nedover. Som forventet resulterte en konstant massestrømningshastighet i en større antenkelig sky på parkeringsplassen sammenlignet med en tømning gjennom samme TPRD-diameter. Den mindre diameteren på 0,5 m resulterte i en antenkelig sky av betydelig mindre størrelse enn det som ble produsert ved større diametre på TPRD, f.eks. 2 og 3,34 mm. For «typiske» TPRD -diametre i scenarier med lukkede rom volder ikke trykket bekymring når ventilasjonen er tilstrekkelig.

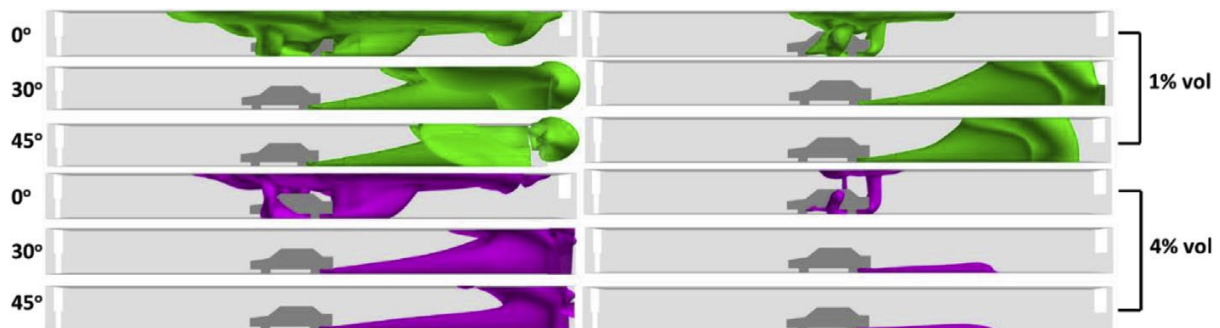


Figur 8 Iso-overflate som viser 1 % hydrogenmolfraksjon for utslipp fra 700 bar gjennom en 0,5 mm TPRD-diameter for utslipp nedover (venstre) og oppadgående utslipp (høyre) [29].

Som en av nyhetene i dette arbeidet ble det sammenlignet nedadgående og oppadgående utslipp fra en 700 bars lagringstank gjennom en 0,5 mm TPRD. Som vist i figur 8 ble det funnet at utslipp nedover resulterte i et større antenlighetsområde i nærheten av bilen. Imidlertid var den gjennomsnittlige hydrogenkonsentrasjonen i den antenkelige skyen lavere enn i tilfellet

Leksjon 11: Lukkede rom

med oppadgående utslipp. I kontrast førte den oppadgående utløsningen til et stort antenelighetsområde under taket, men ikke rundt bilen. Både nedadgående og oppadgående utslipp fra 700 bar til en diameter på 0,5 mm i en overbygd parkeringsplass kan betraktes som et sikrere valg, kombinert med passende tankdesign, og produserer en avgrenset antenelig sky som kan spre seg raskt. Særlig ble tre forskjellige utslippsvinkler nedover (0° , 30° og 45°) sammenlignet for å forstå effekten av hydrogenutslippets retning. Som vist i figur 9, produserte den rette nedadgående frigjøringen en antenelig sky rundt bilen, om enn kort, men dette kan by på utfordringer for de første respondentene å få tilgang til bilens passasjerer i tilfelle tenning. Nedadgående utslipp i vinkler på 30° og 45° mot baksiden av bilen presset den brennbare gassen bort fra bilens omgivelser, noe som gjorde det tryggere i forbindelse med rømning. Disse faktorene bør tas i betraktning i utformingen av TPRD-er for lagring ombord i hydrogenbiler.



Figur 9 Iso-overflateplott på 1 og 4 vol-% hydrogen-molfraksjon for 2 mm TPRD-diameter (venstre) sammenlignet med 0,5 mm diameter (høyre) for forskjellig utslippsretning ved 20 sek strømningstid.

Andre risikoanalyser og tilhørende risikoer som er relevante for bruk av FCH-kjøretøyer i de underjordiske transportsystemene finnes i HyTunnel-CS-prosjektet (<https://hytunnel.net/>), spesielt Deliverable D3.1 – Detailed research programme on hydrogen fires in confined structures (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf).

9. Tunneler

Bruk av FCH-kjøretøy eller transport av komprimert hydrogengass (CGH_2) og kryogent flytende hydrogen (LH_2) i tunneler og lignende lukkede rom skaper nye utfordringer for sikkerhet for liv og helse, eiendom og miljøvern på et akseptabelt risikonivå. Flere studier har vist at innelukking eller overbelastning kan føre til alvorligere konsekvenser sammenlignet med ulykkene i åpen atmosfære. En kritisk analyse av farer og tilhørende risikoer som er relevante for bruk av FCH-kjøretøyer i de underjordiske transportsystemene ble utført i Deliverable 1.2 of HyTunnel-CS project (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf).

Leksjon 11: Lukkede rom

Relevant grunnleggende kunnskap om hydrorgenfrigjøring, -brann og -eksplosjon har gitt tidligere, f.eks. Ventilasjon (avsnitt 5 i denne leksjonen), pressure peaking fenomenen (avsnitt 6 i denne leksjonen), frigjøring av høytrykkshydrogenstråler (leksjon 9 - separasjon fra hydrogenflammer og brannbekjempelse) og hydrogeneksplosjon (leksjon 10 - Håndtering av hydrogeneksplosjoner). Det er noen få andre unike egenskaper for tunneler som bør drøftes særskilt.

9.1 Effekt av ventilasjonshastighet på spredning i tunneler

Passiv ventilasjon forekommer vanligvis i en tunnel på grunn av stempeleffekten som initieres av kjøretøy i bevegelse eller den meteorologiske tilstanden, f.eks. trykkforskjell over munningene. Aktiv ventilasjon er også svært sannsynlig, spesielt i lange tunneler, for å fjerne forurensninger fra kjøretøyutslipp eller røyk ved brann.

Ventilasjonen påvirker sterkt spredningen av farlige gasser. Nøyaktig hvor kjøretøyene befinner seg samt tunnelens geometri kan være viktig, fordi dette påvirker det genererte strømningsfeltet. Ventilasjon kan ha både positive og negative effekter på spredningen av hydrogen.

De positive sidene er:

- det kan fortynde hydrogenkonsentrasjonene og minimere størrelsen på den antennelige skyen;
- den kan trygt transportere ubegrenset mengde hydrogen ut av tunnelen gjennom munninger og sjakter hvis hydrogenkonsentrasjonen er under LFL.

De negative aspektene er:

- en antennelig sky kan utvides lenger unna selve utslippet;
- turbulensen kan induseres av ventilasjon, noe som kan øke forbrenningshastigheten og dermed overtrykk i tilfelle antennelse.

Ved langsgående ventilasjon kreves en minimal lufthastighet for å fjerne farlig gass og røyk. Hydrogen oppfører seg på samme måte som røyk fra en brann på grunn av den høye oppdriften. For branner i tunneler ble den kritiske hastigheten studert som en funksjon av varmeutslippshastigheten. En ventilasjonshastighetsverdi på 3,5 m/s synes å være tilstrekkelig for de fleste tunnelbranner for å forhindre «back-layer»-effekt, inkludert store branner på mer enn 100 MW (https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf).

Ventilasjon i tunneler har generelt en gunstig effekt på fortykning av hydrogendosen og trygg fjerning av hydrogen, noe som gjør at områdene med hydrogenkonsentrasjon kan falle under 4 % vol (LFL). Under visse forhold kan imidlertid ventilasjon transportere og forlenge den brennbare skyen, noe som fører til bevegelse av brennbar sky mot andre kjøretøyer eller langs ventilasjonskanaler og sjakter. Følgelig må det utføres ytterligere eksperimentelle studier for å undersøke den optimale ventilasjonshastigheten i dette scenarioet og skape grunnlag for mer

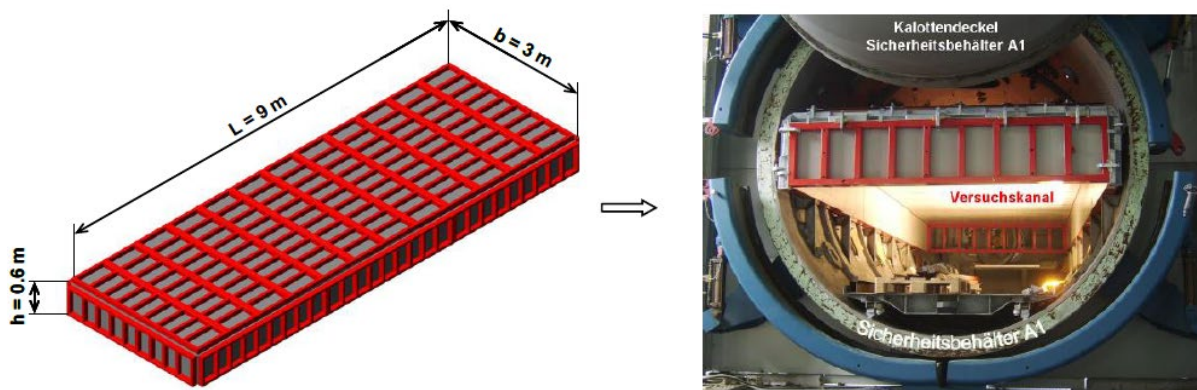
Leksjon 11: Lukkede rom

generelle universelle anbefalinger om effektiviteten av ventilasjon i tunneler. Videre må effekten av tunnelens helling på strømming og spredning av hydrogen tas med i fremtidig forskning. Maksimal helling som er tillatt i henhold til det europeiske direktiv 2004/54/EF er 5 % for nybygde tunneler. Videre sier direktivet at ved stigninger over 3 % er det nødvendig med ytterligere tiltak for å øke sikkerhetsnivået.

9.2 Overgang fra deflagrasjon til detonasjon (DDT) i tunneler

DDT-fenomener har blitt diskutert i detalj i leksjon 10, der DDT-kriteriene hovedsakelig ble beskrevet for lukket geometri med jevn konsentrasjon av hydrogen i oksidanten (luft eller oksygen). På grunn av hydrogenlekkasje eller utilsiktet hydrogenutslipp fra høytrykkstank i en tunnel kan imidlertid en ikke-ensartet, f.eks. lagdelt hydrogen-/luftblanding dannes fortrinnsvis i takdelen av en tunnelkonstruksjon.

Det er utført flere eksperimenter og digitale simuleringer med hensyn til forbrenning og detonasjon i et delvis lukket rom av en sjiktdelt hydrogen-/luftblanding som er typisk for ulykkescenarioer i en tunnelgeometri. Eksperimenter med hydrogenforbrenning i et tynt, delvis lukket sjikt er har blitt utført inne i sikkerhetsbeholderen med et volum på 100 m³ [22]. Sylindervolumet har 3,5 m innvendig diameter og 12 m lengde. En veggtykkelse på 80 mm gjør det mulig å utføre detonasjonseksperimenter direkte i volumet. En rektangulær boks med dimensjonen 9×3×,6 m³ ble installert inne i sikkerhetsbeholderen, som vist i figur 10. Når det gjelder geometri og dimensjoner, er et slikt eksperimentoppsett godt egnet for å simulere hydrogenulykker i tunnelmiljø eksperimentelt.

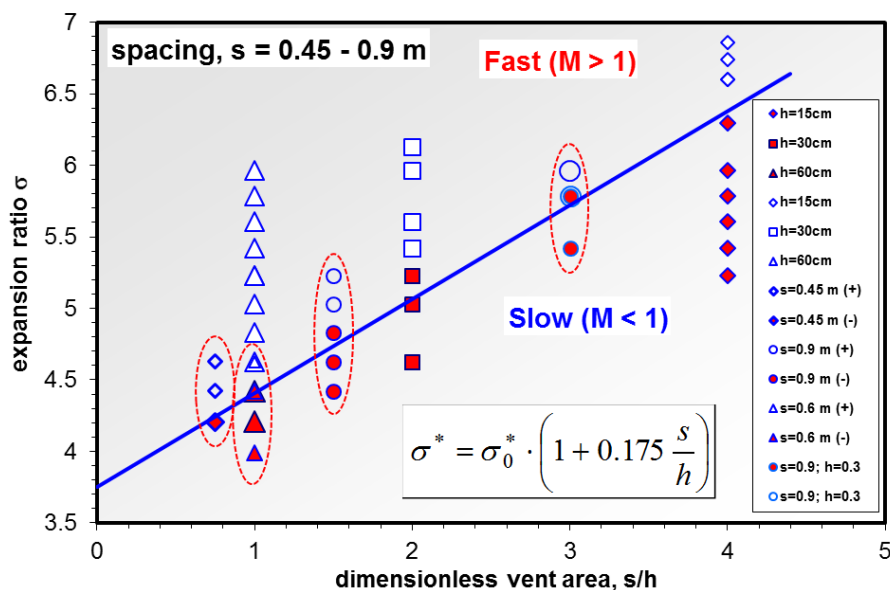


Figur 10 Hoveddimensjoner for boksen med flatt sjikt (til venstre) og boksen med tynne sjikt installert i sikkerhetsbeholderen (til høyre) [22].

De eksperimentelle dataene om karakteristisk trykk og flammehastigheter for ensartede sammensetninger indikerte at terskelverdien mellom de langsomme og hurtige flammeregimene i halvåpne kanaler er lydets hastighet i reaktanten, mens det i lukkede kanaler er produktenes hastighet [23]. Den høyere hydrogenkonsentrasjonen eller den mer reaktive blandingen må nå lydets hastighet når det tynnere sjiktet (tykkelse h) involveres. Ekspansjonsforholdet er en kritisk indikator på potensialet for flammeakselerasjon [23, 24]. I figur 11 oppsummeres de eksperimentelle dataene for ekspansjonsforholdet σ som en funksjon

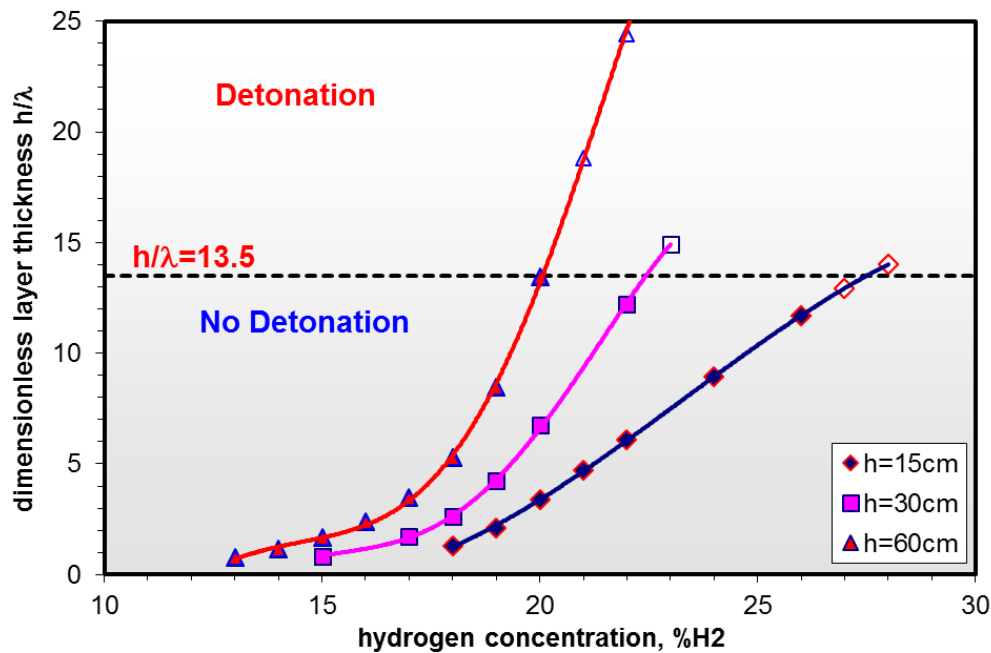
Leksjon 11: Lukkede rom

av det dimensjonsløse ventilasjonsområdet (definert som forholdet mellom sjiktykkelse t og avstanden mellom hindringer for delvis avsondrede sjikt s). En lineær korrelasjon mellom det kritiske ekspansjonsforholdet σ^* for rask flammespredning i et flatt sjikt og gjensidig sjiktykkelse l/h eller avstand mellom hindringene s ble avledet. For ensartede blandinger skjer detonasjonen ved ulike hydrogenkonsentrasjoner avhengig av sjiktykkelsen, f.eks. 27 % for $h = 0,15$ m, 23 % for $h = 0,3$ m og 21 % for $h = 0,6$ m. Resultatene antyder at tynnere sjikt trenger en mer reaktiv blanding ved detonasjon enn tykkere sjikt. Siden energitapene og blandingens reaktivitet er gjensidig korrelert med sjiktykkelsen h og bredden på detonasjonscellen λ kan det dimensjonsløse forholdet mellom sjiktykkelsen over detonasjonscellebredde forventes å være konstant for de kritiske detonasjonsforholdene.



Figur 11 Kritiske forhold for en effektiv flammeakselerasjon som funksjon av ekspansjonsforholdet kontra dimensjonsløst ventilasjonsområde: sonisk flamme og detonasjoner (åpne punkter), subsonisk flamme (faste punkter) [22].

Figur 12 bekrefter at den dimensjonsløse sjiktykkelsen for kritiske forhold for utløst detonasjon er nesten den samme, $h/\lambda = 13-14$, for tre undersøkte sjiktykkelser fra 15 til 60 mm [22]. Denne verdien stemmer godt overens med tidligere eksperimenter utført på et anlegg i mindre skala $h/\lambda = 7-15$ [23].



Figur 12 Kritiske forhold for DDT i forholdet mellom den dimensjonsløse sjikttykkelsen og hydrogenkonsentrasjonen: detonasjon (åpne punkter); ingen detonasjon (faste punkter) [22].

10. Regimer for innendørs hydrogenbranner

Temaet hydrogenbranner ble diskutert tidligere i den aktuelle leksjonen. Når det gjelder innendørs hydrogenbranner, hvis brannen er tilstrekkelig kort og hvis den ikke støter på en vegg eller annen overflate, gjelder nomogrammet som ble presentert i forrige leksjon når man skal forutsi flammelengden. Arbeidet beskrevet i 'leksjon 10 - Håndtering av hydrogeneksplosjoner' vedrørende effekten på vegger og barrierer er også relevant for jetbranner som treffer direkte mot hindringer i innkapslingen. Hydrogenutslipp i innkapslingen forekommer ofte i nærheten av eller langs en vegg eller en overflate, noe som kan forlenge jetflammen eller rekkevidden for en uantent stråle ved å redusere medrivning av luft. Dermed kan fareavstandene øke. Dette er viktig når man vurderer plasseringen av utstyr og hydrogenlagring (spesielt plasseringen av TPRD ved en hvilken som helst lagringstype) i forhold til vegger og til underlaget. Brannens oppførsel avhenger også av utslippsforholdene og geometrien til innkapslingen og ventilasjonen. Innendørs hydrogenbranner kan være godt ventilert og underventilert.

10.1 Godt ventilerte branner

Hvis innkapslingen har ventilasjon, vil oksygen som kreves for å opprettholde hydrogenforbrenning strømme inn i innkapslingen gjennom ventilasjonsåpningene. Når ventilasjonen er tilstrekkelig i innkapslingen, vil flammen være drivstoffstyrt og kan betraktes som godt ventilert [11].

Leksjon 11: Lukkede rom

Den generelle regelen for en innendørs brann med en øvre ventil er som følger: økningen av hydrogenutslippshastigheten endrer brannregimet fra:

- godt ventilert brann (for små strømningshastigheter), til
- underventilert brann med ytre flamme (for moderate strømningshastigheter), til
- underventilert brann med selvslukking av forbrenning (for høyere strømningshastigheter), og igjen til
- underventilert brann med ytre flamme (for svært høye strømningshastigheter).

En numerisk studie ble utført ved bruk av en moderne modell for å forstå underliggende fysiske fenomener ved innendørs hydrogenbrann. Den anvendte CFD -modellen er beskrevet i [12, 13]. Syv numeriske eksperimenter med én enkelt ventilasjonsåpning ble utført for en brenselcellelignende innkapsling med dimensjonene $L \times B \times H = 1 \times 1 \times 1$ m og med ventilasjonsåpningen plassert sentralt øverst på den ene veggen (tabell 1). Utslippet ble rettet vertikalt oppover. Hydrogenutslippsrøret var 10 cm langt med en indre diameter på 5,08 mm plassert i midten av gulvet i innkapslingen, 10 cm over gulvet. Tykkelsen på innkapslingens aluminiumsvegger var 2 cm. Ytterligere detaljer om beregningsdomenene er å finne i [13].

Tabell 1. Detaljer om de numeriske eksperimentene [13].

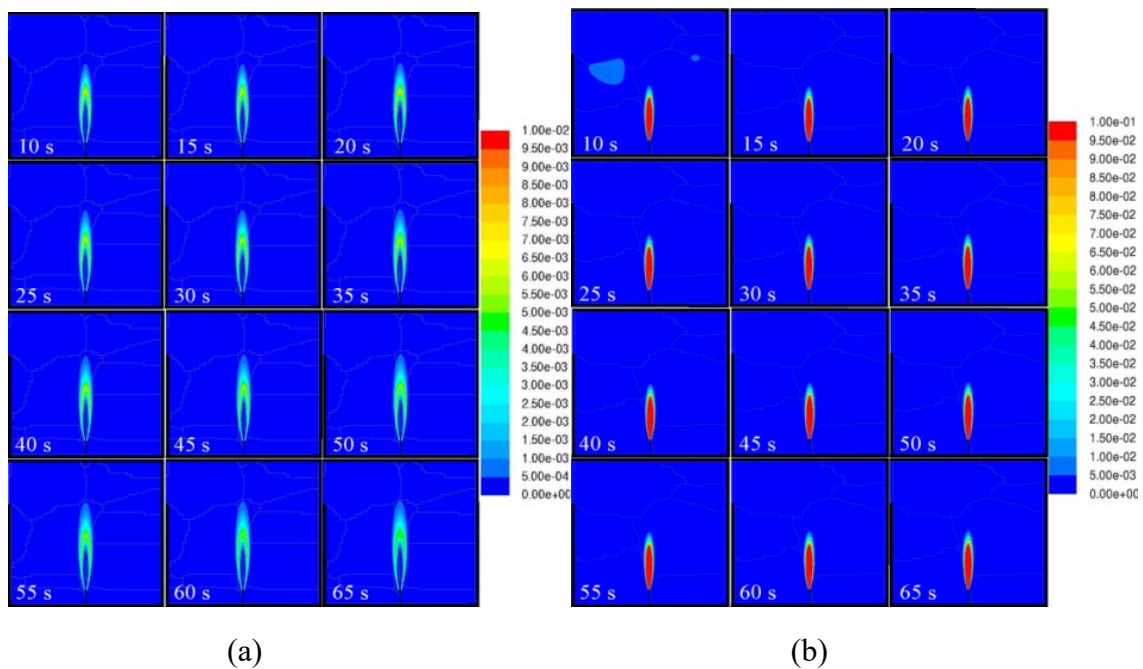
Nr.	Ventilasjonsdimensjon, HxB	Hastighet, m/s	Strømningshastighet, g/s	Resultat
1	Horisontal 3× 30 cm	600 m/s	1,0857	Selvslukking
2	Horisontal 3× 30 cm	300 m/s	0,5486	Selvslukking
3	Horisontal 3× 30 cm	150 m/s	0,2714	Ytre flamme
4	Vertikal 30× 3 cm	600 m/s	1,0857	Ytre flamme
5	Vertikal 30× 3 cm	60 m/s	0,1086	Godt ventilert
6	Vertikal 13,9×3 cm	600 m/s	1,0857	Selvslukking
7	Vertikal 13,9×3 cm	300 m/s	0,5486	Ytre flamme

Figur 13 viser dynamikken i en godt ventilert hydrogenstrålebrann i det numeriske eksperimentet nr. 5, der den laveste hastigheten på frigjøringen er 60 m/s. Den vertikale ventilasjonen er plassert ved venstre vegg. På slutten av det numeriske eksperimentet var brannen i forholdsvis stasjonær tilstand. Reaksjonssonen, som er forbundet med nærvær av hydroksylradikaler OH, øker noe i tidsperioden fra 10 s til 65 s (figur 13a). Det er praktisk talt ikke noe hydrogen som forlater innkapslingen (figur 13b). Hydrogenmolfraksjon i ventilen er ubetydelig, størrelsesorden 2×10^{-4} . Dette indikerer at brannen er godt ventilert under forholdene i simulering nr. 5.

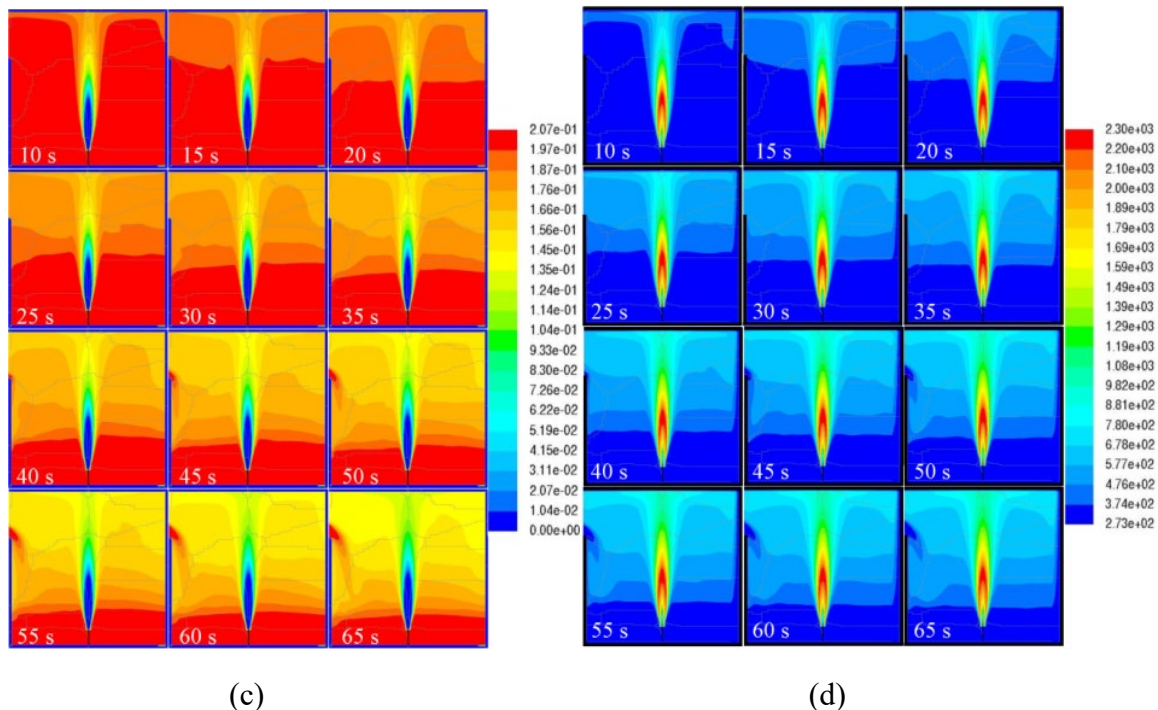
Figur 13c viser et svært langsom forbruk av det første oksygensjiktet nederst i innkapslingen, noe som kan forklares med at inntak av oksygen utenfra gjennom den nedre delen av ventilasjonen opprettholder flammen (inntak av luft ses tydelig i øyeblikksbildene).

Leksjon 11: Lukkede rom

Temperaturkonturer (figur 13d) bekrefter at sjiktet finnes nederst i innkapslingen, der den opprinnelige temperaturen opprettholdes. I en innkapsling i form av et rom ville dette skape gunstige forhold for evakuering av beboerne. Det er verdt å merke seg at stråling ikke er tatt for i denne modellen, noe som vil påvirke godkjenning av et sikkerhetsteknisk design basert på skadelige kriterier for termisk strålingsfluks. Temperaturen synker fra 2300 K i flammen til ca. 750-1000 K i varmestrømmen under taket. Denne temperaturen er sannsynligvis tilstrekkelig til å antenne eventuelle brennbare materialer, spesielt i nærvær av vanndamp (H_2O -molfraksjon under taket er i området 0,11 til 0,13 ved 65 sek). Noen komponenter i brenselcelleboksen kan imidlertid bli ødelagt. Den eneste forskjellen på numerisk eksperiment nr. 4 er en tidobling av hydrogenutslippshastigheten. Den godt ventilerte brannen observeres for hydrogenutslippshastighet på 60 m/s, og en underventilert brann med overgang til en ytre flamme observeres for utslippshastighet på 600 m/s.



Leksjon 11: Lukkede rom



Figur 13. 2D snitt langs innkapslingen senterlinje, simulering nr. 5 (godt ventilert brann) [13]: (a) OH-radikal-molfraksjon, (b) H₂ molfraksjon, (c) O₂ molfraksjon, og (d) temperatur.

10.2 Underventilert brann

Hvis det foreligger utilstrekkelig ventilasjon, vil flammen være ventilasjonsstyrt og kan betraktes som *underventilert*. I tilfelle der flammen er underventilert, vil ikke alt hydrogen forbrukes i nærheten av lekkasjen og vil bare brenne der oksygen er tilgjengelig, derfor vil det være både varme produkter og eventuelt hydrogen eller en ytre flamme ved ventilasjonsåpningen[14].

Utviklingen av et varmt sjikt i taket avhenger av størrelsen og plasseringen av ventilasjonsåpningene (hvis noen) i forhold til størrelsen på lekkasjen. Ved utilstrekkelig ventilasjon i forhold til lekkasjen vil det varme sjiktet vokse nedover gjennom innkapslingen. Dette innebærer både termiske farer og kvelningsfare.

Etter hvert som flammen blir stadig mer underventilert, reduseres oksygenivået i innkapslingen frem til det øyeblikket oksygen og dermed forbrenning forefinnes i nærheten av ventilasjonsåpningen og danner en ytre flamme. Det kan være liten eller ingen forbrenning i resten av innkapslingen der hydrogen akkumuleres. Hvis lekkasjen i dette tilfeller deretter ble stoppet (avstengning) eller redusert gjennom tømning, kan den ytre flammen brenne tilbake inn i rommet der det kan forefinnes en ferdigblandet brennbar atmosfære, noe som kan føre til en eksplosjon [14].

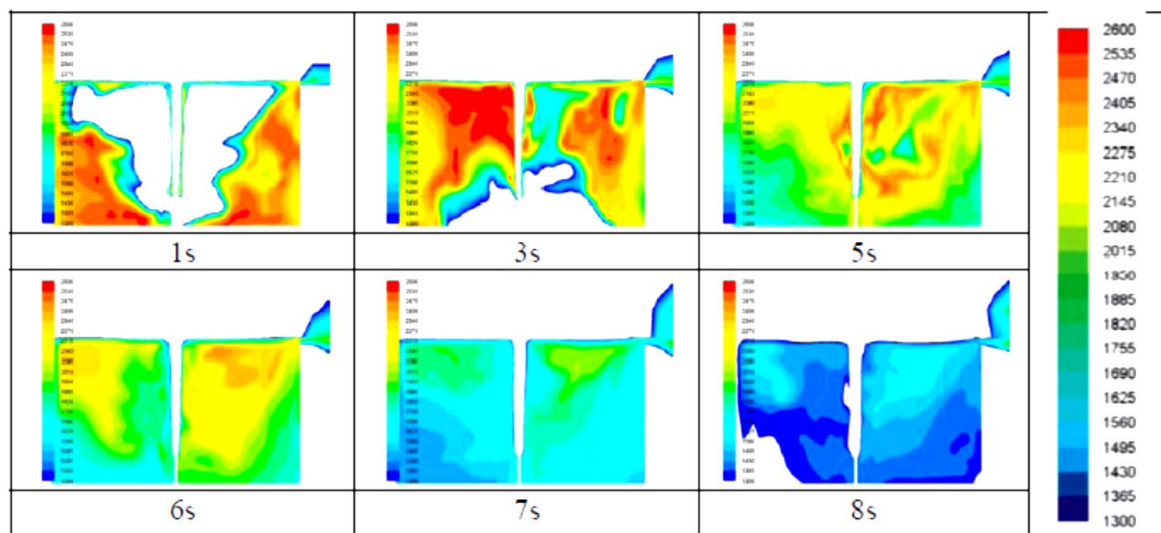
Hvis innkapslingen ikke har ventilasjon, vil det ikke være mulig for oksygen å strømme inn i innkapslingen, og dermed vil flammen bruke opp oksygenet i innkapslingen til drivstoff, eller oksygen forbrukes og flammen slukker [14].

Leksjon 11: Lukkede rom

Produktet av hydrogenforbrenning er vann, og derfor er det mulig ved minimal ventilasjon og en liten flamme at vanddamp som produseres ved hydrogenforbrenning kombinert med forbruk av oksygen kan føre til en selvslukking av flammen. Hvis det skulle oppstå selvslukking og hydrogenlekkasjen ikke ble stoppet ved slukking, ville det utvikle seg et scenario der innkapslingen vil bli fylt med uforbrent hydrogen. Hvis lekkasjen senere stenges av, blir hydrogenet tømt, og det dannes en forhåndsblandet brennbar atmosfære i innkapslingen. Nærvær av varme overflater eller en lignende antenneskilde kan føre til gjenantennelse og en potensiell eksplosjon. På grensen til et underventilert tilfelle forefinnes den ytre flammen ved ventilasjonsåpningen. Ved selvslukking finnes det ingen flamme, verken indre eller ytre. Detaljene i numeriske eksperimenter (tabell 1) på underventilert hydrogenstrålebrann og selvslukkingsdynamikk i en innkapsling er hentet fra [13] og beskrevet nedenfor.

10.3 Selvslukkende flammemodus

La oss vurdere et scenario med en jetbrann fra en TPRD i en liten garasje med størrelse $L \times B \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m og volum $30,4 \text{ m}^3$. En enkelt ventilasjonsåpning som tilsvarer en typisk murstein $L \times H = 25 \times 5$ cm er plassert i flukt med taket og utelukker hensyn til trykkeffekter. Hydrogen frigjøres gjennom 5,08 mm-røret med en hastighet på 390 g/s. Forbrenning av det frigjorte hydrogenet i garasjen bruker oksygen i luften og produserer vann. En selvslukking av hydrogen i innkapslingen kan forventes i løpet av kort tid. Numeriske simuleringer av dette scenarioet har faktisk vist en reduksjon av temperaturen i innkapslingen som vist i figur 14 og områdene med hydroksyl (OH) assosiert med reaksjonssoner allerede etter 3 sekunder.



Figur 14. Konturer med statisk temperatur fra 1300 til 2600 °C tilsvarende den synlige flammen (2D-snitt gjennom midten av garasjen) [15].

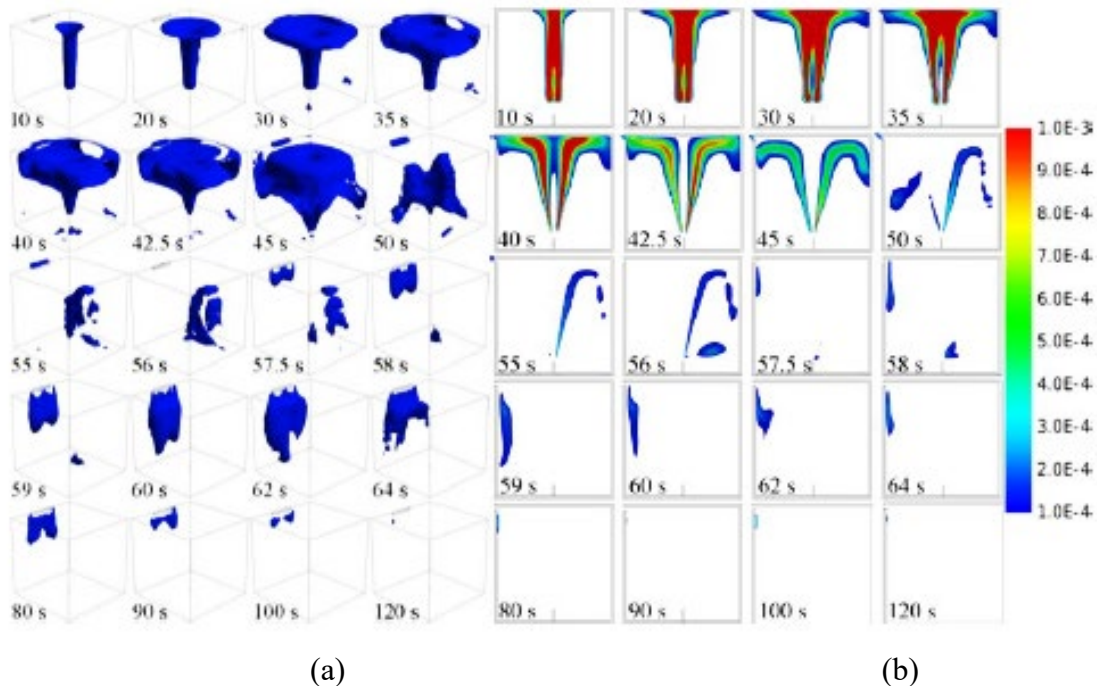
Selvslukking av en hydrogenflamme i innkapslingen med en horisontal ventilasjonsåpning plassert øverst på en vegg ble rapportert for første gang i [12]. Analysen av det numeriske eksperimentet, spesielt av hydroksyl (OH)-konsentrasjon, bidra til å forstå selvslukkingsprosessen. Bruken av gjennomsnittsverdier for parametrene for

Leksjon 11: Lukkede rom

innkapslingsvolum under den underventilerte brannen kan gi en indikasjon på øyeblikket da forbrenningen reduseres, men det kan i betydelig grad gi en underestimering av tidspunktet da flammen er helt opphørt. De numeriske eksperimentene viste et komplekst strømningsmønster gjennom ventilen i begge retninger under den underventilerte brannen. Full selvslukking ble observert da hele ventilasjonsområdet var fylt av luftinntak inn i innkapslingen i en begrenset periode. Årsaken til denne observasjonen ble antatt å være nedkjøling av varme forbrenningsprodukter ved vedvarende hydrogenutslipp og til en viss grad ved varmeoverføring til veggene i innkapslingen. Arbeidet [13] utvider de første numeriske eksperimentene og tar sikte på å forstå innendørs hydrogenbranner i innkapslingen med en horisontal eller vertikal ventilasjonsåpning plassert øverst på den ene veggen og et vedvarende hydrogenutslipp med konstant strømningshastighet og temperatur.

Selvslukking av hydrogenflammer innendørs ble også simulert i det numeriske eksperimentet nr. 1 med den horisontale ventilasjonen (tabell 1) [12]. La oss ta for oss dynamikken i selvslukking observert i simulering nr. 2 (utslippshastigheten på 300 m/s) og sammenligne den med simuleringen nr. 1 (utslippshastigheten på 600 m/s). Figur 15 viser dynamikken i OH-molfraksjonen for simulering nr. 2 i 3D (figur 15a) og 2D (figur 15b). Reaksjonskonturen (OH molfraksjon iso-overflate av 1×10^{-4}) viser plasseringen av forbrenning med flammer og forflytter seg ut av innkapslingen på omtrent 30 sekunder. Denne reaksjonssonen utenfor innkapslingen skiller seg fra reaksjonssonen inne i innkapslingen ved 45 sek og eksisterer til ca. 56 sek. Størrelsen på denne ytre, lille reaksjonssonen overstiger ikke to ventilasjonshøyder. På omtrent samme tid, ved 56-57 sek, skjer det luftinntrengning i innkapslingen som understøtter en svak reaksjon like under ventilen. Denne indre reaksjonssonen opphører praktisk talt ved ca. 120 sek. I motsetning til eksperimentet nr. 4 med den ytre flammen, i simuleringen nr. 2 med selvslukking, opphører forbrenningen i strålen først på venstre side, som er nærmere ventilasjonen, ved 55-56 sek. Dette kan forklares og stemme overens med tilstedeværelsen av litt større mengde oksygen på dette tidspunktet nederst på høyre side av strålen (figur 15a).

Leksjon 11: Lukkede rom

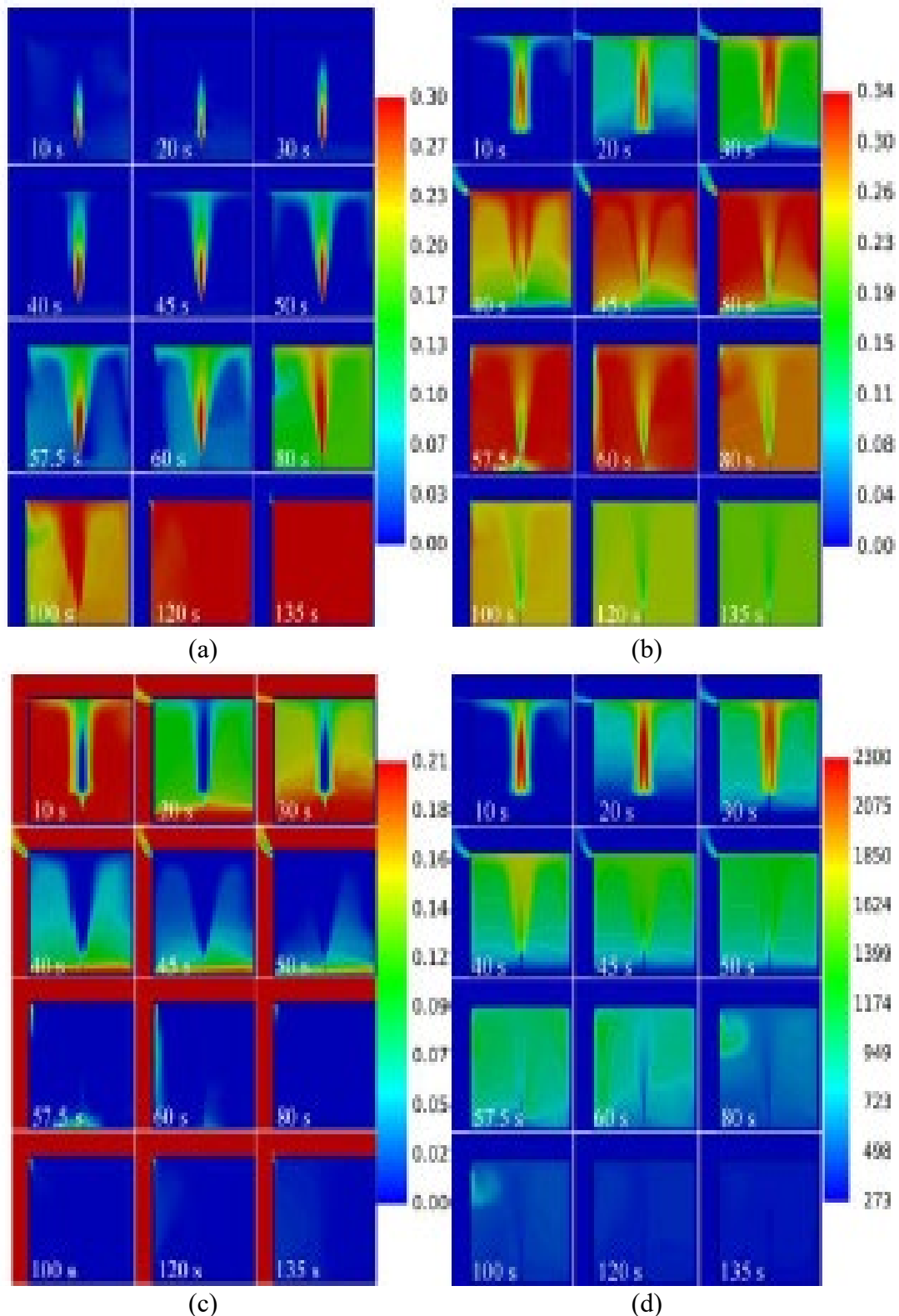


Figur 15. Hydroksyl-OH-molfraksjon i $1 \times 1 \times 1$ m innkapsling, simulering nr. 2 (selvlukking av hydrogenstrålebrann) [13]: (a) 3D-visning av iso-overflaten til OH 1×10^{-4} , (b) 2D -snitt langs innkapslingens senterlinje.

Den begrensede reaksjonssonen utenfor innkapslingen i perioden 30-56 sek kan forklares ved analyse av artskonsentrasjoner som vises i figur 16. I løpet av denne perioden overstiger hydrogenkonsentrasjonen i strømmen ut av innkapslingen ikke ca. 7-10 vol.-%, vannkonsentrasjonen øker fra ca. 15 til over 34 vol.-%, og oksygenkonsentrasjonen synker fra omtrent 10 vol.-% til 0 vol.-%. Antennelighetsdiagrammet viser at denne blandingen med luften er like på grensen til det antennelige området [16]. I simulering nr. 2 reagerer denne blandingen med luft under forhold når temperaturen på blandingen er ganske høy og synker til omtrent 800 K bare på slutten av denne perioden.

Som det fremgår av figur 16 avsluttes strømmen ut av innkapslingen etter 50 sek, og det skjer bare innstrømning i innkapslingen (se øyeblikksbildene som tilsvare 57,5 sek til 120 sek). For at selvsukkingen skal kunne skje i tråd med simulering nr. 1, må det derfor være en lengre periode der det etter den første forbrenningsfasen etterfulgt av avkjøling av varme produkter med «kaldt» hydrogen, skjer inntak av luft gjennom hele ventilasjonsåpningsområdet inn i innkapslingen.

Leksjon 11: Lukkede rom



Figur 16. 2D-snitt langs senterlinjens simulering nr. 2 (selvslukking av hydrogenstrålebrann) [13]: (a) H₂-molfraksjon, (b) H₂O-molfraksjon, (c) O₂-molfraksjon og (d) temperatur.

Figur 16 (a) viser at innkapslingen etter 2 minutter etter frigjøringen er fylt med hydrogen med en molfraksjon over det støkiometriske nivået, >0,30. I likhet med simulering nr. 4 med den vertikale utluftningen er strålen litt skrå mot veggen med ventilasjonen. Maksimal molandel av

Leksjon 11: Lukkede rom

vann observeres ved 50-60 s. Det skjer en sterk stratifisering av oksygen på tidspunktet 40-50 sek, med praktisk talt null konsentrasjon på toppen og så å si opprinnelig oksygenkonsentrasjon på 20,7 vol. % på bunnen. Temperaturen faller til omtrent 100 grader over initiell temperatur etter 2 minutter med antent frigjøring. Dette resultatet kan brukes som en indikasjon på brannmotstandstid for komponenter i brenselcelleinnkapslingen.

Den tidligere konklusjonen om at selvslukking alltid observeres når det er en periode med luftinntak i innkapslingen gjennom hele ventilasjonsområdet, blir bekreftet i eksperiment som svarer til forholdene i simulering nr. 6 (tabell 1) med vertikal ventilasjon av det minste området. Som ytterligere støtte for denne regelen var det ikke en slik periode i simulering nr. 7 (ytre flamme).

10.4 Ytre flammemodus

Figur 17 viser resultatene av simulering nr. 4 for utslipp med en hastighet på 600 m/s, når det skjer en overgang av en intern jetbrann i innkapslingen til en ytre flammemodus. Molfraksjonen av hydroksyler i flammen ved 10 sek er lik 0,01, noe som er karakteristisk for forbrenning ved normale atmosfæriske forhold. Deretter reduseres maksimal OH-molfraksjon sammen med en krymping av sonen der den høyeste molfraksjonen av OH er til stede. Dette er tenkt på grunn av fortykning av jetflammen med medrevne forbrenningsprodukter. Maksimal molfraksjon av OH overstiger ikke $7,5 \times 10^{-3}$ på 20 sek.

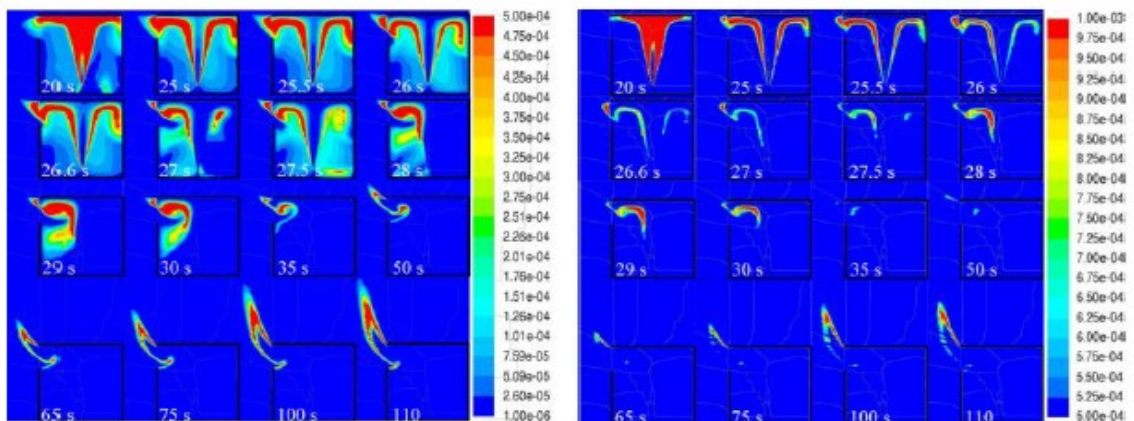
Figur 17a viser utviklingen av reaksjonssonen under overgangen av forbrenningen til den ytre flammen ved visualisering av OH -molfraksjonen i området fra 1×10^{-6} til 5×10^{-4} , mens et bilde i figur 17b tilsvarende området 5×10^{-4} - 1×10^{-3} . Det skjer ingen eller svært liten reaksjon utenfor innkapslingen i opptil 20 sekunder. Mens forbrenningshastigheten inne i innkapslingen synker etter 20 sek, begynner reaksjonssonen å bevege seg ut av innkapslingen gjennom ventilen, og den ytre flammen er synlig over innkapslingen etter 50 sek. Figurene 17a og 17b viser tydelig at reaksjonen først opphører på jetflammesiden vis-a-vis ventilasjonsåpningen øverst på venstre vegg. Figur 17b viser at det er en kontinuerlig reaksjonssone på begge sider av ventilasjonen. Denne sonen forbinder den indre reaksjonen i området der frisk luft kommer inn i innkapslingen med den ytre flammen som strømmer ut av blandingen i innkapslingen av hydrogen og forbrenningsprodukter i atmosfærisk luft. Disse to motsatte strømmingene gjennom ventilasjonsåpningen skaper en reagerende virvel i innkapslingen nær ventilasjonsåpningen og stabiliserer den nedre flammekanten. Den øvre kanten av den ytre flammen er festet til den øvre kanten av ventilasjonen.

Utviklingen av hydrogenmolfraksjonen i innkapslingen er vist i figur 17c. Brann skjer i det godt ventilerte regimet frem til ca. 20 sekunder, da det ikke lenger finnes hydrogen som forlater innkapslingen på grunn av fullstendig forbrenning på innsiden. Akkumuleringen av hydrogen er noe høyere på siden av strålen vis-a-vis veggen med ventilasjonsåpningen. Strålen er noe avbøyd mot ventilen (se øyeblikksbildet på 50 s). Molfraksjonen av hydrogen er over 0,30 praktisk talt i hele innkapslingen på tidspunktet 65 sek, med unntak av et lite område nær

Leksjon 11: Lukkede rom

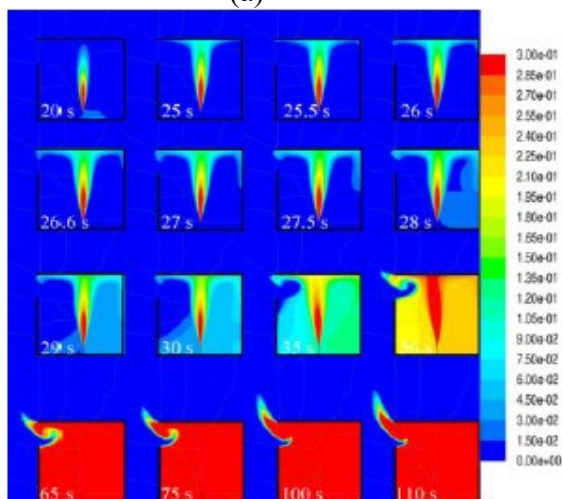
ventilasjonsåpningen der luften strømmer inn. Molfraksjonen av hydrogen ved 110 sek er henholdsvis 0,48 til 0,50 på gulv- og taknivå.

Maksimal mengde vanndamp observeres ved 27-30 s (figur 17d), lik simulering nr. 1 med en horisontal ventilasjon av det samme området rapportert i [12]. Etter dette reduseres molfraksjonen av vann monoton i tid på grunn av at vannet rives med i den vedvarende hydrogenstrålen og strømmer ut av innkapslingen (som en del av antennelig blanding).

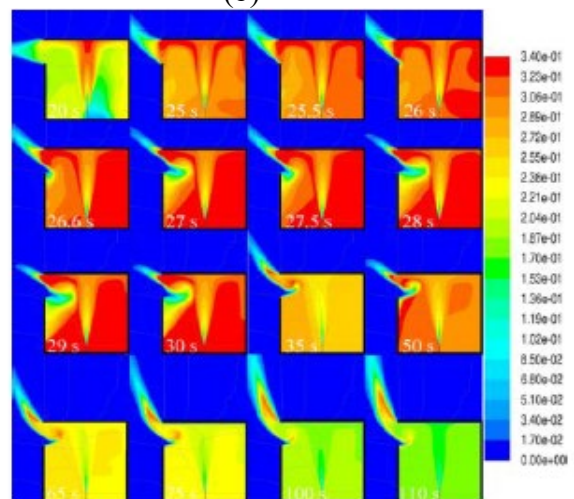


(a)

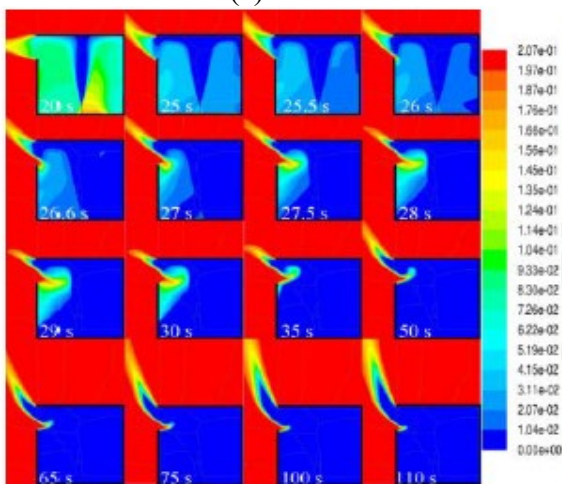
(b)



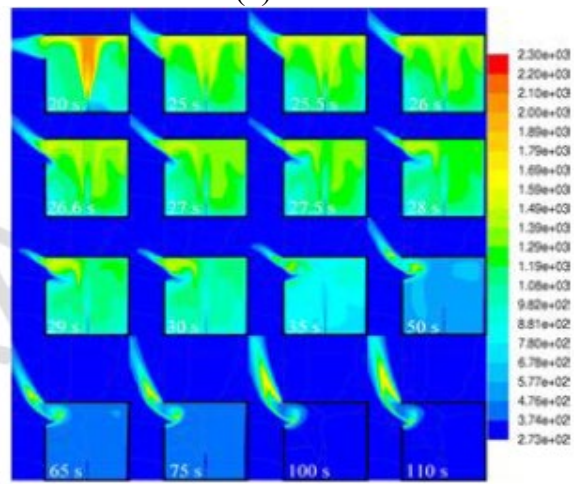
(c)



(d)



(e)



(f)

Leksjon 11: Lukkede rom

Figur 17. 2D-snitt langs innkapslingens senterlinje, simulering nr. 4 (hydrogen-jetbrann, ytre flammemodus) [13]: (a) OH-molfraksjon, område 1×10^{-6} – 5×10^{-4} , (b) OH-molfraksjon, område 5×10^{-4} – 1×10^{-3} , (c) H₂-molfraksjon, (d) H₂O-molfraksjon, (e) O₂-molfraksjon og (f) temperatur.

På et kritisk tidspunkt for flamme-»overlevelsen» ved omtrent 50 sek, når overgangen til den ytre flammen begynner, øker molfraksjonen av hydrogen i utstrømningen til omtrent 0,2, og vann (fortynningsmiddel) synker til 0,2-0,3. Denne blandingen anses å være i det brennbare området iht. antennelighetsdiagrammet for hydrogen-/luft-/fortynningsmiddelblanding ved atmosfærisk trykk og temperatur, hvis effekten av temperaturen blir neglisjert. Dermed gir tilgjengeligheten av brennbar blanding som strømmer ut av innkapslingen og tilstedeværelse av reaksjon (antennelseskilde) betingelser for overgang til forbrenning utenfor innkapslingen.

Figur 17e viser at oksygenmolfraksjonen i innkapslingen gradvis avtar og er praktisk talt lik null ved 35 sek, ekskludert et lite område nær ventilasjonen. Deretter brenner luften som kommer et lite stykke inn i innkapslingen og blir umiddelbart ført inn i strømmen av hydrogen og forbrenningsprodukter som strømmer ut av innkapslingen gjennom den øvre delen av ventilasjonen. Temperaturdynamikk innenfor og utenfor innkapslingen er vist i figur 17f. Øyeblikksbildet som tilsvarende 50 sek viser en viktig rolle for den reagerende virvelen som dannes i ventilasjonsskjæringsområdet mellom blandingen som forlater innkapslingen og luft som kommer inn i innkapslingen, for flammens bærekraft og overgangen mellom underventilert intern brann til ytre flammemodus.

For den horisontale ventilen i det samme området ble det i simulering nr. 3 observert at den ytre flammen ble etablert ved en lavere hydrogenhastighet, 150 m/s. Den samme utslippshastigheten som i simulering nr. 4 (vertikal ventilasjon), dvs. 600 m/s, for den horisontale ventilen resulterte i at flammen selvslukket (simulering nr. 1). Selvslukking ble også observert ved en hastighet på 300 m/s (simulering nr. 2). Dermed ligger en hastighetsgrense som skiller den ytre flammemodusen og selvslukningsmodusene mellom 150 m/s og 300 m/s for den gitte geometrien.

Den ytre flammen observeres i simulering nr. 7 med en vertikal ventilasjon av det minste området og for utslippshastigheten på 300 m/s. Økning i utslippshastigheten til 600 m/s (simulering nr. 6) resulterte i selvslukking. Legg merke til at et karakteristisk trekk ved selvslukningsfenomenet er at det forekommer en periode med luftinntak i innkapslingen gjennom hele ventilasjonsområdet (ikke bare en del av ventilasjonsområdet).

11. Bruk av e-Laboratory

11.1 Passiv ventilasjon i en innkapsling med én ventilasjonsåpning: jevnt fordelt hydrogenkonsentrasjon

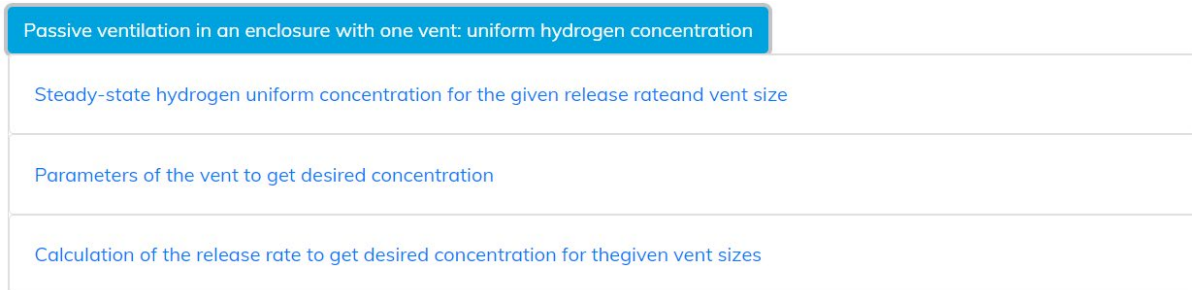
Dette verktøyet består av tre alternativer for beregning av følgende tre funksjoner:

1. Jevnt fordelt konsentrasjon av hydrogen i stasjonær tilstand for den gitte utslippshastigheten og ventilasjonsstørrelsen;

Leksjon 11: Lukkede rom

2. Parametere for ventilasjonen for å få ønsket konsentrasjon for det gitte utslippet;
3. Utslippshastigheten for å få ønsket konsentrasjon for de gitte ventilasjonsstørrelsene.

Teoriene er å finne i avsnitt 5 i denne leksjonen. For å ta i bruk verktøyet, som vist i figur 18, er det første trinnet å velge modellen som brukes for spesielle oppgaver.



Figur 18 Valg av riktig modell for en bestemt oppgave

Oppgave 1: Jevnt fordelt hydrogen i stasjonær tilstand for den gitte utslippshastigheten og ventilasjonsstørrelsen.

Inngangsparametrene er vist i tabell 2, og skjermbildet av verktøyets innstilling er vist i figur 19.

Tabell 2 Inngangsparameter for oppgave 1

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Strømningshastighet for hydrogenmasse	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0,0001-1	0,001
Omgivelsestrykk	p_2	Pa	33700-107900	101325
Omgivelsestemperatur	T_2	K	240-350	293
Ventilasjonshøyde	H	M	0,001-10	2
Ventilasjonsbredde	W	M	0,001-10	1
Utladningskoeffisient	C_D	-	0,4-1	0,6

Leksjon 11: Lukkede rom

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Ambient pressure

p_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Figur 19. Innstilling av verktøyet for oppgave 1

Utgangsparameter er hydrogen volumfraksjonen. Et eksempel på utgangsparameteren er vist i figur 20, som indikerer at for den gitte verdien av inngangsparametrene i figur 19, er den beregnede hydrogen volumfraksjonen 0,048377 i innkapslingen.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figur 20. Utdata fra verktøyet for oppgave 1

Oppgave 2: Ventilasjonsparametere for å få ønsket hydrogenkonsentrasjon.

Med dette verktøyet kan brukeren beregne parametrene for ventilasjonen, f.eks. bredde eller høyde, for mulig frigjøring for ikke å overskride det nødvendige nivået av hydrogenkonsentrasjon, f.eks. 25 % fra nedre antenelighetsgrense på 4 % (LFL).

Leksjon 11: Lukkede rom

Inngangsparametrene er vist i tabell 3, og skjermbildet av innstillingen til verktøyet er vist i figur 21. Det er verdt å merke seg at i dette tilfellet, må enten ventilasjonshøyde, H eller ventilasjonsbredde, W , angis ved å skrive inn en verdi enten for H eller W og la den ikke-nødvendige parameteren (H eller W) stå tom. Hvis for eksempel H brukes som inngangsparameter, må W være tom for innstillingen, og omvendt.

Tabell 3 Inngangsparameter for oppgave 2

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Strømningshastighet for hydrogenmasse	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0,0001-1	0,001
Omgivelsestrykk	p_2	Pa	33700-107900	101325
Omgivelsestemperatur	T_2	K	240-350	293
Velg enten høyde eller bredde	H/W	M	0,001-10	2
Utladningskoeffisient	C_D	-	0,4-1	0,6
Ønsket molfraksjon av hydrogen	X	-	0-1	0,04

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W m

Calculate Reset

Figur 21. Innstilling av verktøyet for oppgave 2

Utgangsparameteren er enten ventilasjonshøyde eller ventilasjonsbredde ved en gitt massestrømningshastighet. Et eksempel på utgangsparameteren er vist i figur 22, som indikerer

Leksjon 11: Lukkede rom

at for den gitte verdien for inngangsparametrene i figur 21, er den nødvendige ventilasjonsbredden 0,2 m når ventilasjonshøyden er satt til 0,2 m.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figur 22. Utdata fra verktøyet for oppgave 2

Oppgave 3: Utslippshastighet for å få ønsket konsentrasjon ved gitte ventilasjonsstørrelser

Med dette verktøyet kan brukeren beregne tillatt massestrømningshastighet for de aktuelle ventilasjonsparametrene for ikke å overskride det nødvendige hydrogenkonsentrasjonsnivået, f.eks. 25 % fra nedre brennbarhetsgrense på 4 % (LFL).

Inngangsparametrene er vist i tabell 4, og skjermbildet av innstillingen til verktøyet er vist i figur 23.

Tabell 4 Inngangsparameter for oppgave 3

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinns tillinger
Omgivelsestrykk	p_2	Pa	33700-107900	101325
Omgivelsestemperatur	T_2	K	240-350	293
Ventilasjshøyde	H	M	0,001-10	2
Ventilasjonsbredde	W	M	0,001-10	1
Utladningskoeffisient	C_D	-	0,4-1	0,6
Ønsket molfraksjon av hydrogen	X	-	0-1	0,04

Leksjon 11: Lukkede rom

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Figur 23. Innstilling av verktøyet for oppgave 3

Utgangsparemeteren er den påkrevde hydrogenmassestrømningshastigheten. Et eksempel på utgangsparemeteren er vist i figur 24, som indikerer at for den gitte verdien av inngangsparemetrene i figur 23, er den nødvendige hydrogenmassestrømningshastigheten $1 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1}$.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	P_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Expert to CSV Change inputs Dataset name Save

Figur 24. Utdata fra verktøyet for oppgave 3

11.2 Pressure peaking phenomenon for uantente utslipp

Dette verktøyet består av to alternativer for å løse følgende to oppgaver:

1. Pressure peaking phenomenon med konstant massestrømningshastighet
2. Pressure peaking phenomenon med dynamisk tanktømming

Teorien om pressure peaking phenomenon (PPP) er blitt diskutert i nærmere detalj i avsnitt 6 i denne leksjonen. For å implementere verktøyet som vist i figur 25, er det første trinnet å velge modellen som brukes for spesielle oppgaver. Modellbeskrivelsen vises når du trykker på riktig knapp på startskjermen i verktøyet.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

Constant mass flow rate

Tank blowdown

Figur 25. Valg av riktig modell for en bestemt oppgave med PPP

Oppgave 1: Pressure peaking phenomenon med konstant massestrømningshastighet.

Inngangsparametrene er vist i tabell 5, og skjermbildet av verktøyets innstilling er vist i figur 26.

Tabell 5 Inngangsparameter for oppgave 1 i PPP (uantent tilfelle)

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Atmosfærisk trykk	p_{atm}	Pa	101325 – 90 000 000	101325
Innkapslingstemperatur	T_{encl}	K		293,15
Innkapslingsvolum	V_{encl}	m ³		30,42
Ventilasjonshøyde	H_{vent}	M		0,05
Ventilasjonsbredde	W_{vent}	M		0,25
Massestrømningshastighet for hydrogen	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0,39
Utslippskoeffisient	C_D	-		0,6
Tidsintervall for integrasjon	Δt	s		1
Antall tidsintervaller for integrasjoner	n_{last}	-	500-100 000	1000

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Hydrogen mass flow rate

 kg/s

Coefficient of discharge

Time step for integration

 s

Number of time steps for integration

Figur 26. Inngangsparametere for oppgave 1 i PPP (uantent tilfelle)

Når beregningen er ferdig, skal grafen for trykket p_{g_encl} (Y-akse) mot tid t (X-akse) PPP plottes. Trykkaksen skal ha aksetittel i forhold til de trykkenheter som ble valgt i utgangspunktet, f.eks. Trykk (bar/Pa/kPa osv.). Et eksempel på utgangsparameter er vist i figur 27.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

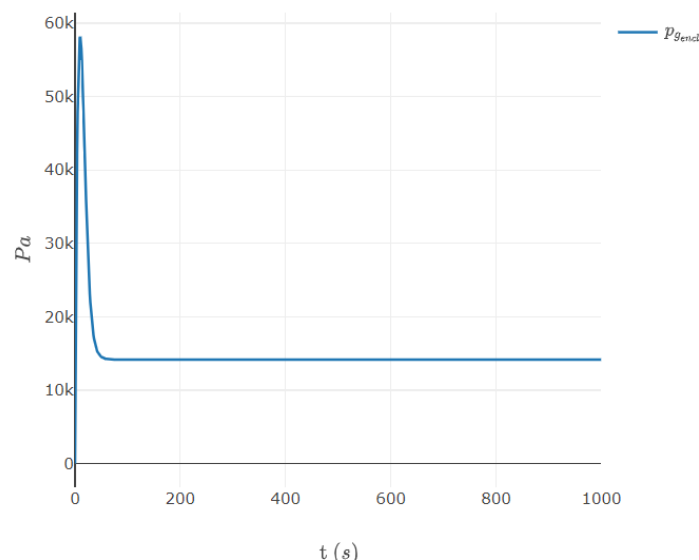
Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.39	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figur 27. Utdata fra verktøyet for oppgave 1 av PPP (uantent tilfelle)

Plott av trykk som funksjon av tid er vist i figur 28.



Figur 28. Plott for trykk kontra tid for oppgave 1 i PPT (uantent tilfelle)

Oppgave 2: Pressure peaking phenomenon med dynamisk tanktømming

Inngangsparametrene er vist i tabell 6, og skjermbildet av innstillingen til verktøyet er vist i figur 29.

Leksjon 11: Lukkede rom

Tabell 6 Inngangsparameter for oppgave 2 i PPP (uantent tilfelle)

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Atmosfærisk trykk	p_{atm}	Pa	101325 – 90 000 000	101325
Innkapslingstemperatur	T_{encl}	K		
Innkapslingsvolum	V_{encl}	m ³		
Ventilasjonshøyde	H_{vent}	M		
Ventilasjonsbredde	W_{vent}	M		
Utslippskoeffisient	C_D	-		0,6
Innledende hydrogentrykk i reservoaret	p_{res}^0	Pa		
Innledende hydrogentemperatur i reservoaret	T_{res}	K		
Reservoarvolum	V_{res}	m ³		
Åpningsdiameter	d_3	M		
Innledende gjetning for integrasjonstid	t_{f0}	s		
Antall tidsintervaller for integrasjoner	i_{last}	-		

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

Atmospheric pressure

 101325 Pa

Enclosure temperature

 293.15 K

Enclosure volume

 30.42 m³

Vent height

 0.05 m

Vent width

 0.25 m

Coefficient of discharge

 0.6

H2 pressure in reservoir

 20500000 Pa

H2 temperature in reservoir

 288 K

Reservoir volume

 0.196 m³

Orifice diameter

 0.0095 m

Initial guess for integration time

 10 s

Number of time steps for integration

 1000

Figur 29. Inngangsparametere for oppgave 2 ved PPP (uantent tilfelle)

Når beregningen er ferdig, plottes grafen for trykket p_{g_encl} (Y-akse) mot tid t (X-akse) PPP. Trykkaksen skal ha aksetittel i forhold til de trykkenheter som ble valgt i utgangspunktet, f.eks. Trykk (bar/Pa/kPa osv.). Et eksempel på utgangsparameter er vist i figur 30.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

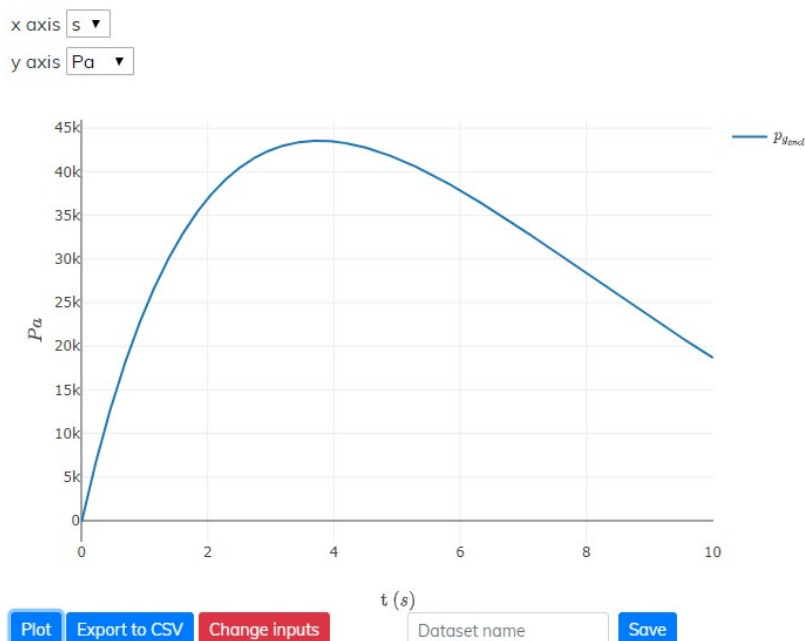
Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gend}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figur 30. Utdata fra verktøyet for oppgave 2 ved PPP (uantent tilfelle)

Plott av trykk som funksjon av tid er vist i figur 31.



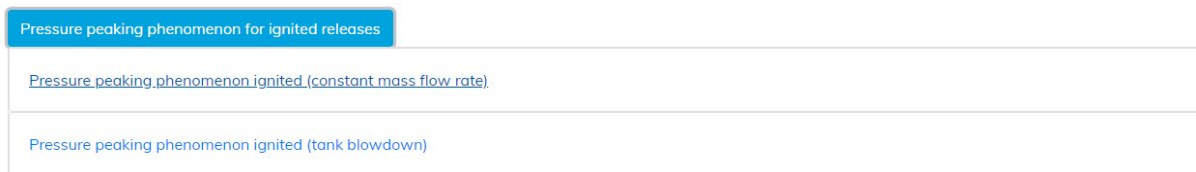
Figur 31. Plottet for trykk kontra tidspunkt for oppgave 2 ved PPT (uantent tilfelle)

Leksjon 11: Lukkede rom

11.3 Pressure peaking phenomenon for antent frigjøring

I likhet med pressure peaking phenomenon (PPP) for ikke uantent frigjøring, består verktøyet for å beregne PPP for antent frigjøring også av to alternativer, knyttet til to forskjellige oppgaver som er de samme som PPP for uantent utslipp.

Først av alt må brukerne velge verktøyet med tittelen Pressure peaking phenomenon for ignited release fra de oppførte verktøyene i e-Laboratory. Velg deretter Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate) for å løse oppgave 1 eller Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown) for å løse oppgave 2, som vist i figur 32.



Figur 32. Valg av riktig verktøy for en partikkeloppgave.

Oppgave 1: Pressure peaking phenomenon med konstant massestrømningshastighet.

Inngangsparametrene er oppført i tabell 7, og skjermbilde av verktøynnstilling er vist i henholdsvis figur 33. Forskjellen på inngangsparametere i det antente tilfellet er kravet om en tilleggsparameter, C_I .

Tabell 7 Inngangsparameter for oppgave 1 ved PPP (antent tilfelle)

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Atmosfærisk trykk	p_{atm}	Pa	101325 – 90 000 000	101325
Innkapslingstemperatur	T_{encl}	K		293,15
Innkapslingsvolum	V_{encl}	m ³		30,42
Ventilasjonshøyde	H_{vent}	M		0,05
Ventilasjonsbredde	W_{vent}	M		0,25
Massestrømningshastighet for hydrogen	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0,39
Utslippskoeffisient	C_D	-		0,6
Tidsintervall for integrasjon	Δt	s		1
Antall tidsintervaller for integrasjoner	n_{last}	-		1000
Koeffisient for antent frigjøring	C_I	-		1

Merk: Inngangsverdi for C_I markert med gult skal bare vises i det antente tilfellet.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Hydrogen mass flow rate

 kg/s

Coefficient of discharge

Sought factor

Time step for integration

 s

Number of time steps for integration

Figur 33. Inngangsparametere for oppgave 1 ved PPP (antent tilfelle)

Skjermbildet av utgangsparametrene og et eksempel på trykkdiagrammet som en funksjon av tid er vist i henholdsvis Figur 34 og Figur 35.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

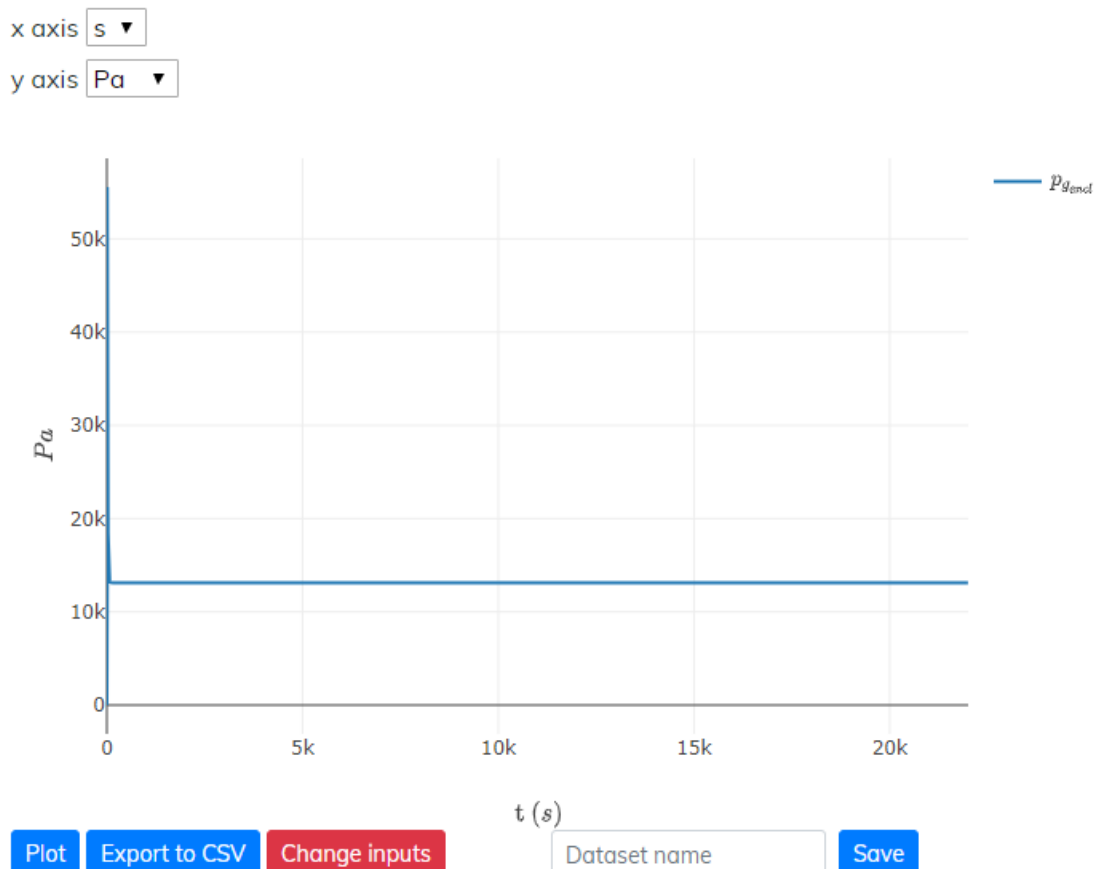
» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.017	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_c	22	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figur 34. Utdata fra verktøyet for oppgave 1 ved PPT (antent tilfelle)



Figur 35. Plott av trykk kontra tidspunkt for oppgave 1 ved PPP (antent tilfelle)

Leksjon 11: Lukkede rom

Oppgave 2: Pressure peaking fenomenon med dynamisk tanktømming

Inngangsparametrene er oppført i tabell 8, og skjermbilde av verktøynstillingen er vist i henholdsvis figur 36.

Tabell 8 Inngangsparameter for oppgave 2 i PPP (antent tilfelle)

Parameternavn	Symbol	Enhet	Grenser (min-maks)	Standardinnstillinger
Atmosfærisk trykk	p_{atm}	Pa	101 325 – 90 000 000	101 325
Innkapslingstemperatur	T_{encl}	K		
Innkapslingsvolum	V_{encl}	m ³		
Ventilasjonshøyde	H_{vent}	M		
Ventilasjonsbredde	W_{vent}	M		
Utslippskoeffisient	C_D	-		0,6
Innledende hydrogentrykk i reservoaret	p_{res}^0	Pa		
Innledende hydrogentemperatur i reservoaret	T_{res}	K		
Reservoarvolum	V_{res}	m ³		
Åpningsdiameter	d_3	M		
Innledende gjetning for integrasjonstid	t_{j0}	s		
Antall tidsintervaller for integrasjoner	i_{last}	-		
Koeffisient for antent frigjøring	C_I	-		1

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

Sought factor

H₂ pressure in reservoir PaH₂ temperature in reservoir K

Reservoir volume

 m³

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Figur 36. Inngangsparametere for oppgave 2 i PPP (antent tilfelle)

Skjermbildet av utgangsparametrene og et eksempel på trykkdiagrammet som en funksjon av tid er vist i henholdsvis figur 37 og figur 38.

Leksjon 11: Lukkede rom

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_c	22	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{maz}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

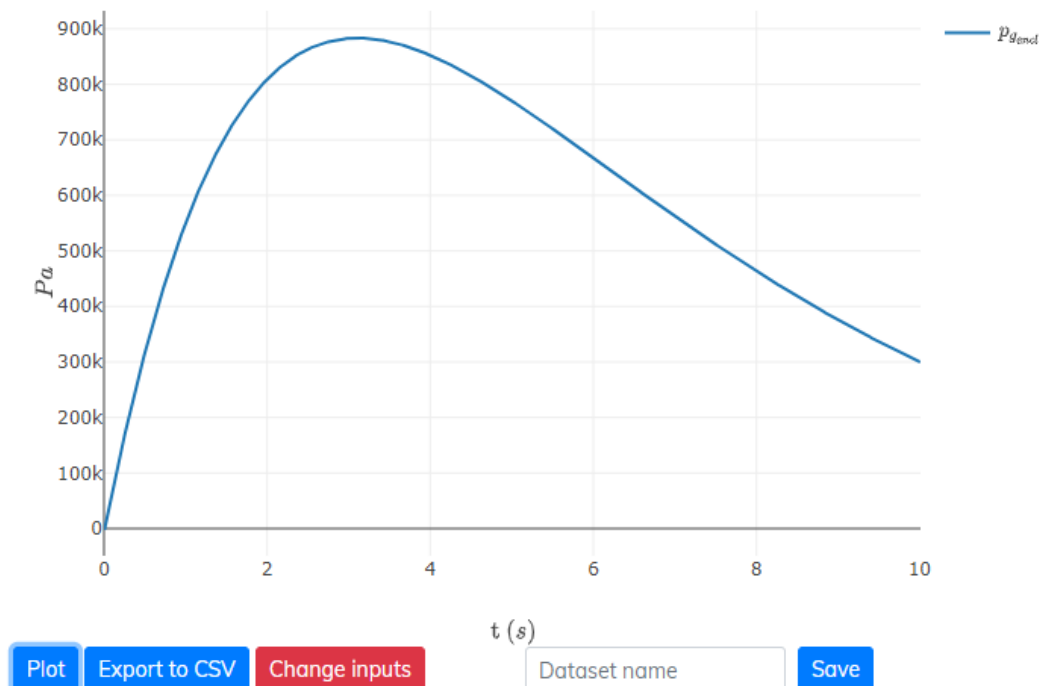
[Save](#)

Figur 37. Utdata fra verktøyet for oppgave 2 av PPP (antent tilfelle)

Leksjon 11: Lukkede rom

x axis s ▼

y axis Pa ▼



Figur 38. Plott av trykk kontra tidspunkt for oppgave 2 i PPT (antent tilfelle)

Takk

Takk til HyResponse-prosjektet. Materialet som presenteres her er utvidede eksempler basert på de opprinnelige HyResponse-leksjonene.

Referanser

1. HyIndoor project. Available from <https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>. [accessed 07.12.20]
2. HyResponder Deliverable D1.1 – Report on hydrogen safety aspects of technologies, systems and infrastructures (2020). Deliverable will be publically available from: <https://hyresponder.eu/deliverables/> when approved
3. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39, pp. 6268-6285.
4. HyIndoor Deliverable D5.1 – Widely accepted guidelines on FC indoor installation and use (2015). Available from: http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf [accessed 07.12.20].
5. Karlsson, B and Quintiere, J (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press.
6. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
7. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
8. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
9. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ and Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, The Netherlands.
10. Molkov, V, Shentsov, V and Quintiere, J (2014). Passive ventilation of a sustained gaseous release in an enclosure with one vent. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39 (15), pp. 8158– 8168
11. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D , Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: Numerical experiments International Journal of Hydrogen Energy Volume 39, Issue 20, 3 July 2014, Pages 10788-10801
12. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Dynamics of Hydrogen Flame Self-Extinction in a Vented Enclosure. Proceedings of the 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards”, 5-10 May 2013, Providence, RI, USA.
13. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: numerical experiments. Proceedings of ICHS 2013, 9-11 September 2013, Brussels, Belgium.

Leksjon 11: Lukkede rom

14. HyTunnel Deliverable D3.1 – Detailed research programme for hydrogen fires in confined structures (2019). Available from: https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf [accessed 07.12.20].
15. Molkov, V, Bragin, M, Brennan, S, Makarov, D, and Saffers, J-B (2010). Hydrogen Safety Engineering: Overview of Recent Progress and Unresolved Issues. International Symposium of Combustion and Fire Dynamics, October 2010, Santander, Spain.
16. Trevino, C and Mauss, F (1992). Chapter 10 “Structure and Extinction of Non-Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames”, In: Peters, N., Rogg, B., Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems. Lecture Notes in Physics, Volume m15. Springer-Verlag, 1992.
17. EU No 406/2010, Commission Regulation of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. Official Journal of the European Union. Vol. 53, 18 May 2010. Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [accessed on 07.12.20].
18. Brennan, S, Makarov, D and Molkov, V (2010). Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent. Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, April 2010.
19. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, USA, January, 2009.
20. Emmons, DD (1995). Vent flows, SFPE Handbook, ed. P. J. Di Nenno, (2nd Edition). Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, USA.
21. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
22. Kuznetsov, M., Grune, J., Friedrich, A., Sempert, K., Breitung, W., Jordan, T. (2011) Hydrogen-air deflagrations and detonations in a semi-confined flat layer. In: Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the Sixth International Seminar (Edited by D. Bradley, G. Makhviladze and V. Molkov), 125-136.
23. Alekseev, V.I., Kuznetsov, M.S., Yankin, Yu., G., Dorofeev, S.B. (2001) Experimental study of flame acceleration and DDT under conditions of transverse venting. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14/6: 591-596.
24. Dorofeev, S.B., Kuznetsov, M.S., Alekseev, V.I., Efimenko, A.A., Breitung, W. (2001) Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14 (6): 583-589.

Leksjon 11: Lukkede rom

25. Friedrich, A., Grune, J., Jordan, T., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kuznetsov, M., Sempert, K., Stern, G. (2007) Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer. In: Proc. 2nd ICHS International Conference on Hydrogen Safety. September 11 - 13, 2007 San Sebastian – SPAIN, paper 1.3.106, 1-12.
26. United States, Department of Energy.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current_technology.html.
27. Brennan S, Makarov D and Molkov V. “Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent”. In: Proceedings of the 6th International seminar on fire and explosion hazards. England: Research Publishing; July 2011. ISBN 978-981-08-7724-8.
28. S. Brennan, V. Molkov. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 8159-8166.
29. H. Hussein, S. Brennan, V. Molkov. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 23882-23897.