

Författare David Gårsjö, DANMAT konsulter Daniel Lundberg, Ramboll Energy		Granskare Mariana Fridfjell, DANMAT konsulter	
Filnamn Motivering till avstånd i H2TSA 20230613			
Status Version 1		Datum 2023-06-13	
<i>Revision</i>			
Datum	Författare	Revision nr	Revision avser

Motivering till avstånd i H₂-TSA

1 Bakgrund

Syftet med detta dokument är att ge bakgrunden och motiveringarna till följande avståndstabeller i Energigas Sveriges Anvisningar för tankstationer för vätgas, H₂-TSA 2023:

- Tabell 5.1 Avstånd inom anläggning
- Tabell 5.2 Avstånd mellan anläggning och byggnader
- Tabell 5.3 Avstånd mellan anläggning och annan verksamhet
- Tabell 5.4 Avstånd vid samlokalisering med andra drivmedel

Som en del av arbetet med avståndstabellerna för H₂-TSA 2023 har en riskanalys med identifiering av olycksscenarion genomförts av arbetsgruppen för H₂-TSA 2023. Denna lista finns som separat fil (Grovanalys HAZID H2-TSA Slutlig_scenarier sorterad.pdf). Med bakgrund i riskranking av dessa identifierade olycksscenarion och diskussioner kring vad som kunde beaktas som dimensionerande skadefall valde arbetsgruppen för H₂-TSA 2023 ut ett antal olycksscenarion. Denna lista finns som separat fil (Grovanalys HAZID H2-TSA Slutlig_FU-matris 220204.pdf).

Gexcon genomförde konsekvensberäkningar för dessa utvalda olycksscenarion för att beräkna nödvändiga avstånd för vätgas, Ref. /1/, i denna rapport refererad till som ”Gexcon:s rapport”. När MSB skickade ut en förremiss om revidering av sina föreskrifter om brandfarlig gas och brandfarliga aerosolbehållare, MSBFS 2020:1, bifogades även ett utkast till rapporten *Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer* (MSB2186), Ref. /2/, i denna rapport refererad till som ”MSB:s rapport”.

Skyddsavstånden i Gexcon:s rapport och MSB:s rapport skiljer sig något med bakgrund av urval av olycksscenario, förutsättningar för olycksscenario samt ingångsdata för olycksscenario (t.ex. hålstorlekar, driftstryck, förekomst av brandavskiljning och studerade konsekvensnivåer). Avståndstabellerna för H₂-TSA 2023 är i första hand baserade på MSB:s rapport. Gexcon:s rapport samt existerande och vedertagna avstånd har använts som komplement. Sådana existerande avstånd har hämtats från Tabell 5.1, Tabell 5.2 och Tabell 8.1 i Energigas Sveriges *Anvisningar för tankstationer för metangasdrivna fordon*, TSA 2020.

1.1 Metodik

Arbetet med avståndstabellerna har följt en definierad process i flera steg:

- Definiera vad som är skyddsvärt
- Relevant konsekvens och konsekvensnivå
- Dimensionerande skadefall
- Avstånd för dimensionerande skadefall
- Definiera slutligt avstånd för avståndstabeller

Grundläggande har varit att definiera vad som är skyddsvärd utrustning på vätgasstationen samt skyddsvärda objekt och verksamheter i omgivningen runt vätgasstationen enligt följande:

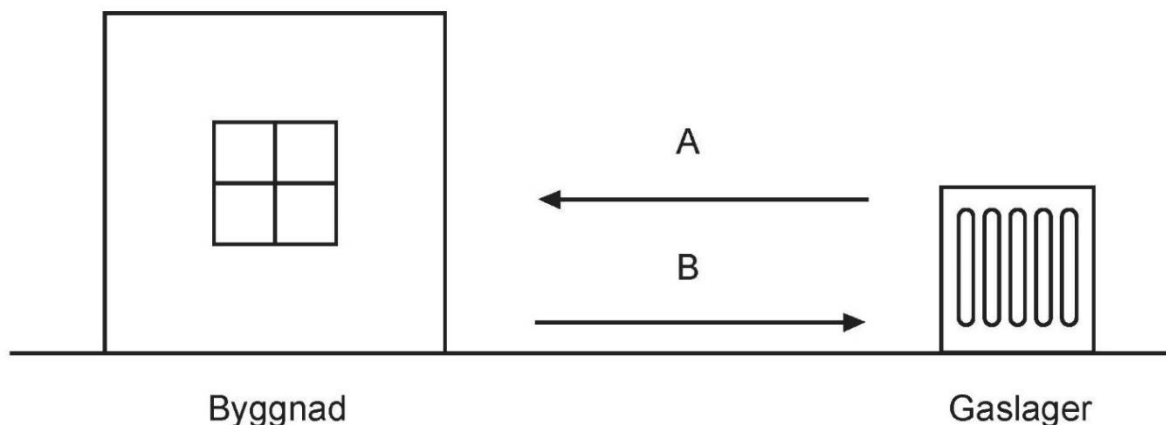
- Utrustning på vätgasstationen som behöver skyddas från annan utrustning på vätgasstationen (Tabell 5.1 i H₂-TSA 2023)
- Objekt och verksamheter i omgivningen som behöver skyddas från vätgasstationen (Tabell 5.2, 5.3 och 5.4 i H₂-TSA 2023)
- Utrustning på vätgasstationen som behöver skyddas från objekt och verksamheter i omgivningen (Tabell 5.2, 5.3 och 5.4 i H₂-TSA 2023)

Målet är att skydda både människor och utrustning vid en olyckshändelse, där konsekvensen kan innebära personskador för människor och materialskador för utrustning med möjlig eskalering och följd effekter som i sin tur kan leda till personskador.

I MSB:s rapport finns ytterligare detaljer gällande skyddsklasser, hålstorlekar för läckage, gränsvärden och i övrigt vad som är dimensionerande för olika scenarier.

Avståndstabellerna för H₂-TSA 2023 är dels baserade på beräknade avstånd för vätgas, dels på beräknade och existerande avstånd för byggnader, verksamheter samt annan brandfarlig vara. Avstånd A är de beräknade avstånden för vätgas. Avstånd B kan utgöras av både beräknade

avstånd för vätgas samt existerande avstånd för byggnader, verksamheter samt annan brandfarlig vara. Detta beror på om det är avstånd mot annan utrustning inom vätgasstationen eller objekt och verksamheter i omgivningen av vätgasstationen. Det längsta avståndet blir dimensionerande. Figur 1-1 illustrerar principen med avstånd A och avstånd B.



Figur 1-1 Illustration av principen med avstånd A och avstånd B

Tabell 5.1 i H₂-TSA 2023 är baserade på beräknade avstånd för vätgas. Tabell 5.2, 5.3 och 5.4 är baserade på både beräknade avstånd för vätgas och på beräknade och existerande avstånd för byggnader, verksamheter samt annan brandfarlig vara, beroende på vad som är dominerande. Avstånden som är dimensionerade av vätgasläckage är beräknade enligt MSB:s rapport och är baserade på påverkan antingen genom temperatur, flamlängd, värmestrålning eller gasspridning (för detaljer, se tabell 8 i MSB:s rapport). Övriga avstånd är antingen tagna från MSB:s rapport eller existerande avstånd. Ytterligare detaljer presenteras för respektive tabell nedan.

I vissa fall kräver tabellerna i denna rapport längre avstånd än MSB:s rapport. Detta beror på förenklingar eller generaliseringar som gör tabellerna lättare att använda. I vissa fall ställs högre krav på brandteknisk avskiljning av samma anledning, eller på grund av att det (i många fall) är det längsta av två avstånd som varje avstånd baseras på. För att förkorta ett sådant avstånd måste hänsyn även tas till det som inte varit dimensionerande.

1.2 Definitioner

Objekt och verksamheter i omgivningen har baserats dels på MSB:s rapport, dels på objekt som förekommer i avståndstabellerna i TSA 2020. För definitioner av dessa objekt hänvisas till dessa skrifter. I detta avsnitt definieras vissa skyddsobjekt som förekommer i tabellerna i kapitel 2. De

har sitt ursprung i MSB:s rapport samt bilaga 3 i MSB:s förremiss gällande vätgastillägg till MSBFS 2020:1.

1.2.1 Samlingslokal

Baseras på definition av verksamhetsklass 2B och 2C enligt Boverkets byggregler (BBR), dvs. lokal med mer än 150 personer.

1.2.2 Mycket svårutrymd byggnad

Baseras på definition av verksamhetsklass 5B-5D enligt Boverkets byggregler (BBR), dvs. byggnad där personerna inte kan förväntas kunna utrymma på egen hand (t.ex. äldreboenden, sjukhus och fängelser).

1.2.3 Stor mängd brännbart material

Här avses t.ex. däckupplag, brädgård, lösa behållare med brandfarlig gas eller vätska med total volym mer än 600 liter. Även cistern ovan jord med brandfarlig gas eller vätska (inkl. påfyllningsanslutning) kan tolkas in i denna definition, men för dessa finns särskilda avstånd angivna i denna rapport.

1.2.4 Folksamling, tredjeperson

Ett antal personer (tredjeperson) som nämnvärt förvärrar för varandra att förflytta sig oberoende av varandra, eller där fler än 10 personer kan förväntas omkomma vid fullt rörbrott. Exempel kan vara torg, festivalområde, större uteservering, utomhusläktare eller utomhusteater.

1.2.5 Enstaka personer, tredjeperson

En eller ett litet antal personer (tredjeperson) som inte nämnvärt försvårar för varandra att förflytta sig oberoende av varandra, och där 10 eller färre personer kan förväntas omkomma vid fullt rörbrott. Detta avstånd används för utrymningsvägar från byggnader i allmänhet, och i vissa fall för parkerade fordon. Denna kategori anges som *Människor, enstaka* i MSB:s rapport.

2 Motivering av avstånd

I detta kapitel framgår kriterier, antaganden och resonemang som ligger till grund för ovan nämnda avståndstabeller. Som tidigare presenterats har de flesta avstånd baserats på MSB:s rapport *Förslag till skyddsavstånd för vätgasininstallationer*. Hur detta genomförts beskrivs närmare nedan.

Avstånden är beräknade konservativt, vilket innebär att det finns tillräckliga marginaler för att kunna avrunda samtliga avstånd till närmaste heltal. I denna rapport har dock en decimal behållits i de flesta fall, i syfte att underlätta spårbarhet.

2.1 Kriterier och antaganden

2.1.1 Utsläppsdimensioner

Avstånden har räknats om utifrån diameter enligt formel i avsnitt 2.8 i MSB:s rapport. För rörledningar i gaslager och kompressor antas en innerdiameter på 12 mm. För tanknings slangar på dispenserar antas en innerdiameter på 6,5 mm, vilket därmed är dimensionerande för vätgasdispenserar. Anledningen till detta är att slangar bedöms som mest troliga läckagepunkter, plus att ett läckage inuti dispensern blir begränsat av skåpet. Slangarna är i det fria, därmed får ett läckage från dessa längre spridning.

Avståndstabellerna är alltså endast giltiga för anläggningsdelar där rör- respektive slangdimensionerna inte överstiger dessa diametrar. Diametrarna baseras på uppgifter från arbetsgruppen för H₂-TSA.

2.1.2 Läckagepunkter

För avstånd som baseras på läckage från en vätgaskomponent (hela tabell 5.1, gröna rutor i tabell 5.2, 5.3 och 5.4) gäller avståndet från närmsta läckagepunkt, dvs. koppling, ventil, slang eller liknande, men inte från helsvetsade rör eller lagerbehållares mantelyta. Det kan i många fall vara enklare att mäta avstånd från exempelvis lagerbehållares mantelyta, särskilt i en planeringsfas då vätgasininstallationernas exakta utformning, och därmed placering av läckagepunkter, inte alltid är känd. Resultatet av detta kan dock bli att avståndet mellan objekten blir längre än nödvändigt.

2.1.3 Tryck

För utsläpp från mobila gaslager har avstånd för 500 bar använts (omräknat för diameter enligt ovan), eftersom detta är det maximala tryck som tillåts enligt H₂-TSA 2023. För stationära gaslager och kompressorbyggnad har avstånd för 1000 bar använts, samt även för vätgasdispensrar, även om max tankningstryck enligt H₂-TSA 2023 är 700 bar. Detta har mindre betydelse, efter som de avstånd som baseras på läckage från en vätgasdispenser är relativt korta.

2.1.4 Gasbehållare

MSB:s rapport skiljer på gasbehållare med hög respektive låg motståndskraft. Detta har beaktats i avståndstabellerna genom att gaslager av komposit har betraktats som gasbehållare med låg motståndskraft, vilket resulterat i längre avstånd, medan gaslager av stål har betraktats som gasbehållare med hög motståndskraft, vilket resulterat i kortare avstånd.

2.1.5 Brandteknisk avskiljning och andra barriärer

Med brandteknisk avskiljning E30, E60, EI 30 eller EI 60 kan avstånd reduceras enligt MSB:s rapport (dörrar med brandteknisk klass får tillgodoräknas om de är självstängande). Detta har även arbetats in för vissa avstånd i tabellerna. Hur reduktionen kan göras varierar, vilket framgår i tabell 20 och 22 i MSB:s rapport. Enligt MSB:s rapport bör en vägledning tas fram för hur barriärmaterial kan utföras. Där anges dock att barriärmaterial som är stabilt fastsatta, liknande en byggnadskonstruktion, kan förväntas motstå tryckpåverkan vid en fördröjd antändning av ett vätgasläckage (5-10 kPa) och kan därför användas tills vidare.

För reduktion av avstånd dimensionerade efter gasspridning till luftintag så krävs ingen speciell klassning av barriären utan det räcker med att den är rimligt tät.

Reducering av avstånd mellan en vätgaskomponent och byggnad eller annat objekt gäller där siktlinjen mellan objekten är skyddad av avskiljningen. För högre byggnader kan därför ytterligare analyser behöva utföras eftersom barriären annars blir orimligt hög.

För reducering av avstånd som är dimensionerat efter påverkan mot människor gäller i stället att den brandtekniska avskiljningen ska vara utförd så att siktlinjen i höjddled från aktuell vätgaskomponent har minst 30° vinkel relativt marken. Motsvarande gäller i sidled, relativt en rak linje mellan vätgaskomponenten och avskiljningen. Detta gäller avstånd till utrymningsvägar, folksamlingar och enstaka personer. Notera att avståndet i enlighet med avsnitt 2.1.2 får dras från potentiella läckagepunkter, exempelvis ventiler, kopplingar eller

slangar, i stället för exempelvis mantelytor på behållare. Genom att analysera placeringen av exakta läckagepunkter kan i vissa fall en orimligt hög avskiljning undvikas.

2.1.6 Isoleringsmöjlighet

MSB:s rapport skiljer i många fall på avståndsberäkningar beroende på möjlighet att automatiskt isolera ett läckage. Enligt avsnitt 7.8 i H₂-TSA 2023 ska säkerhetssystemet på vätgastankstationen kunna detektera och isolera ett utsläpp av vätgas inom 10 sekunder. Därmed begränsas konsekvenserna av ett utsläpp kraftigt. För vätgasdispenser och kompressorbyggnad antas att isoleringsmöjlighet finns.

Gaslager antas här inte ha någon isoleringsmöjlighet. Ett läckage vid en anslutning till en gaslagerbehållare innebär att endast gaslagret eller en sektion av gaslagret kan isoleras mot övriga gassystemet. Det kan dock inte isoleras från läckaget i sig självt och därmed stoppa läckaget från själva gaslagret (eller sektion av gaslagret). För mobila gaslager begränsas utsläppet till viss del, eftersom de enligt H₂-TSA ska ha isoleringsventiler för olika sektioner, där volymen hos varje sektion inte får överstiga 5000 liter. Detta gör dock inte att de kan betraktas som isolerade läckage enligt MSB:s rapport.

2.1.7 Reducering för läckage inuti kompressorbyggnad

Jämförelse av gasspridning och påverkan genom värmestrålning i Gexcon:s rapport visar hur avstånd kan reduceras vid läckage inuti kompressorbyggnad jämfört med utomhus (se Bilaga A). Där dimensionerande skadefall är gasspridning blir reduktionen 50 % (faktor 0,5). För de scenarion där gasspridning från kompressorbyggnaden blivit dimensionerande har denna faktor applicerats på beräknat avstånd enligt MSB:s rapport. Vilket skadefall som är dimensionerande (gasspridning eller jetflamma) framgår i tabell 8 i MSB:s rapport.

2.2 Tabell 5.1 Avstånd inom anläggning

Tabell 5.1 i H₂-TSA 2023 är baserad på beräknade avstånd för vätgas enligt MSB:s rapport, samt resonemang enligt nedan. Avstånd i gula rutor är baserade på påverkan från objekt i den vänstra, gula kolumnen, avstånd i blå rutor är baserade på påverkan från objekt i den översta, blå raden.

Avstånd inom parentes avser avstånd till kompressorbyggnadens luftintag, och baseras på gasspridning. Avståndet före parentesen är till byggnaden i övrigt och baseras på flamlängd (enligt MSB:s rapport).

Tabell 5.1 Avstånd inom anläggning

Anläggningsdel	Kompressorbyggnad (luftintag) ^a	Mobilt gaslager ≤ 500 bar, komposit	Mobilt gaslager ≤ 500 bar, stål	Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, komposit	Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, stål
	meter	meter	meter	meter	meter
Kompressorbyggnad (luftintag) ^a	1,4 (4,8) ^b	6,2 (13,7) ^b	6,2 (13,7) ^b	7,7 (17,3) ^b	7,7 (17,3) ^b
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, komposit	6,2 (13,7) ^b	34 ^c	34 ^c	42 ^d	42 ^d
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, stål	6,2 (13,7) ^b	34 ^c	23 ^c	34 ^d	28 ^d
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, komposit	7,7 (17,3) ^b	42 ^d	34 ^d	42 ^d	42 ^d
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, stål	7,7 (17,3) ^b	42 ^d	28 ^d	42 ^d	28 ^d
Vätgasdispenser	0,7 (5,1) ^b	12,4 ^e	8,3 ^e	12,4 ^e	8,3 ^e
Tankande fordon	6 ^f	12 ^f	6 ^f	12 ^f	6 ^f

- a) Inget avstånd krävs till luftintag till EX-klassade utrymmen med gasdetektor.
- b) Avståndet kan minskas till hälften med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5. Avståndet till luftintag kan ignoreras med lämplig tät barriär.
- c) Avståndet kan minskas till 5,6 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5. Inget avstånd behövs med mur utformad enligt avsnitt 2.2.2.
- d) Avståndet kan minskas till 7,0 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5.
- e) Avståndet kan minskas till 2,1 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5.
- f) Inget avstånd behövs med brandteknisk avskiljning minst EI 60 enligt avsnitt 2.1.5. För kompressorbyggnad kan denna avskiljning utgöras av byggnadens vägg.

2.2.1 Kompressorbyggnad

För avstånd mellan kompressorbyggnad och gaslager antas att en brand i kompressorbyggnaden inte blir dimensionerande. Detta beror främst på att kompressorbyggnaden har läckagedetektion med isolering, se avsnitt 2.1.6. Dessutom begränsas ett utsläpp i byggnaden av väggar, medan ett läckage från gaslagret sker i det fria. Kompressorbyggnaden betraktas därför som *byggnad i allmänhet* med avseende på avstånd till gaslager. Här anses dock inte något avstånd till luftintag

behövas till EX-klassade utrymmen där det finns gasdetektorer. Vid ett läckage som förs in i kompressorbyggnaden är sannolikheten stor att läckaget detekteras och stationen försätts i felsäkert läge, vilket innebär att gasflödet bryts vilket kan stoppa läckaget beroende på var det sker. Framför allt är sannolikheten för antändning liten i dessa utrymmen på grund av EX-klassningen. Detta gäller alltså inte luftintag till andra utrymmen för exempelvis hydraulik eller styr- och elutrustning, som kan innehålla tändkällor.

Samma bedömning har gjorts vid bedömning av avstånd mellan dispenser och kompressorbyggnad.

För avstånd mellan kompressorbyggnader har detta beräknats som avståndet mellan ett vätgasläckage vid 1000 bar med isoleringsmöjlighet och *byggnad i allmänhet*. Avståndet till luftintag har halverats enligt avsnitt 2.1.7. Mellan kompressorbyggnaderna gäller alltså 1,4 meter, men avståndet mellan den ena kompressorbyggnaden och den andra kompressorbyggnadens luftintag ska vara minst 4,8 m. I enlighet med ovan anses inte något avstånd till luftintag behövas till EX-klassade utrymmen där det finns gasdetektorer.

2.2.2 Avstånd mellan mobila gaslager

Avstånd mellan mobila gaslager behövs inte med mur i brandteknisk avskiljning minst EI 60 som är minst 1 meter högre än gaslagren. Bakgrunden till denna lösning presenteras i Bilaga B. Det är tillräckligt om muren är 0,5 meter högre om den kompletteras med lämplig plåt som ger ytterligare 0,5 meters höjd, till en total höjd av 1 meter högre än gaslagren.

2.2.3 Vätgasdispenser

För avstånd mellan vätgasdispenser och gaslager har ett utsläpp från dispensern fått vara dimensionerande. Om ett läckage uppstår från ett gaslager eller kompressorbyggnad är sannolikheten stor att läckaget detekteras och att anläggningen då försätts i felsäkert läge. Det innebär att gasflödet till dispensern stängs om tankning pågår. När inget fordon tankar är dessutom slangen i stort sett trycklös och isolerad från övriga gassystemet. Att dispensern förstörs av en sådan brand får anses acceptabelt, men det kommer inte att leda till en eskalering av branden. Ett läckage (jetflamma) från dispensern mot ett gaslager kan dock innebära en eskalering, vilket ska förebyggas.

Något avstånd bedöms inte behövas mellan vätgasdispensrar. Dels har de isoleringsmöjlighet enligt avsnitt 2.1.6, dels accepteras generell samförläggning av olika typer av pumpar och

dispensrar för drivmedel på tankstationer. Det är dock viktigt att beakta EX-zoner från olika pumpar och dispensrar och deras respektive utrustningskategori, om de skulle hamna i varandras EX-zoner.

2.2.4 Tankande fordon

Tankande fordon (oavsett bränsle) förväntas kunna utsättas för en högre risk än parkerade fordon (se avsnitt 2.4.1) eftersom de vistas på tankstationen och är en del av hanteringen av brandfarlig vara. Att de som tankar utsätts för en högre risk får anses acceptabelt då de inte räknas som *tredjeperson*. Avstånd för tankande fordon baseras därför på brand i fordonet, i syfte att skydda vätgasininstallationerna. Avståndet är baserat på brand i en lastbil eller annat tungt fordon, eftersom sådana kan förväntas tanka på tankstationerna och en brand i ett sådant fordon kan bli mer omfattande än en brand i en personbil. Kompressorbyggnaden har betraktats som *behållare med hög motståndskraft*, då installationerna i denna i huvudsak är stål, och dessutom skyddade av byggnadens väggar, vilket får anses konservativt. För dispensern krävs av naturliga skäl inget avstånd till tankande fordon, eftersom det skulle omöjliggöra tankning.

2.3 Tabell 5.2 Avstånd mellan anläggning och byggnader

Tabell 5.2 i H₂-TSA gäller avstånd mellan anläggningen och byggnader i omgivningen, primärt men inte uteslutande sådana som finns utanför tankstationsområdet. Samtliga avstånd är baserade på påverkan från vätgashanteringen (dvs. objekt i den vänstra, gröna kolumnen), med undantag från de tre blågröna rutorna, där första siffran baseras på brand i byggnad.

Kategorierna *Byggnader i allmänhet*, *Utrymningsväg från samlingslokal* och *Mycket svårutrymd byggnad* har baserats på MSB:s rapport. *Utrymningsväg från byggnad i allmänhet* är en tolkning av MSB:s rapport och baseras på avstånd som gäller för *Enstaka personer, tredjeperson*.

Avstånd inom parentes avser avstånd till byggnadens luftintag, och baseras på gasspridning. Avståndet före parentes är till byggnaden i övrigt, och baseras på flamlängd (enligt MSB:s rapport) eller brand i byggnaden.

Tabell 5.2 Avstånd mellan anläggning och byggnader

Anläggningsdel	Byggnader i allmänhet (luftintag)	Utrymningsväg från byggnad i allmänhet ^a	Utrymningsväg från samlingslokal	Mycket svårutrymd byggnad (luftintag)
	meter	meter	meter	meter
Kompressorbyggnad	7 ^b	28 ^c	42 ^d	7,7 (8,6) ^b
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, komposit	13 (13,7) ^b	23 ^c	45 ^e	13 (43) ^b
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, stål	7 (13,7) ^b	23 ^c	45 ^e	11,3 (43) ^b
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, komposit	13 (17,3) ^b	28 ^c	45	14 (54) ^b
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, stål	7,7 (17,3) ^b	28 ^c	45	14 (54) ^b
Vätgasdispenser	7 ^b	15 ^c	23 ^d	7 (9,3) ^b

- a) Avståndet avser kortaste avståndet mellan anläggningsdelen och den utrymningsväg som ligger längst bort. Om minst en utrymningsväg är avskärmd från anläggningsdelen, till exempel med en mur, eller om den ligger på andra sidan om byggnaden, behövs inget avstånd till övriga utrymningsvägar. Se även Figur 2-2.
- b) Avståndet kan minskas till hälften med brandteknisk avskiljning minst EI 60 enligt avsnitt 2.1.5. Denna avskiljning kan utgöras av byggnadens vägg om den dessutom är av obrännbart material. Avståndet till luftintag kan ignoreras med lämplig tät barriär.
- c) Avståndet kan minskas till ¼ med brandteknisk avskiljning minst E 30 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).
- d) Avståndet kan minskas till 14,0 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).
- e) Avståndet kan minskas till 35,6 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).

2.3.1 Byggnad i allmänhet

Avstånd mellan gaslager/kompressorbyggnad och *Byggnad i allmänhet* (ej luftintag) är i de flesta fall baserade på brand i byggnad enligt tabell 12 i MSB:s rapport, eftersom detta gav längre avstånd än vid påverkan av en jetflamma från gaslagret. Flera avstånd förekommer i tabell 12, men här har de längsta valts, som gäller för *industribyggnad och motsvarande med brännbar fasad*. Undantaget är stationärt gaslager för tryck upp till 1000 bar i stål, där avståndet i stället dimensionerats efter påverkan från gaslagret (eftersom detta var längre).

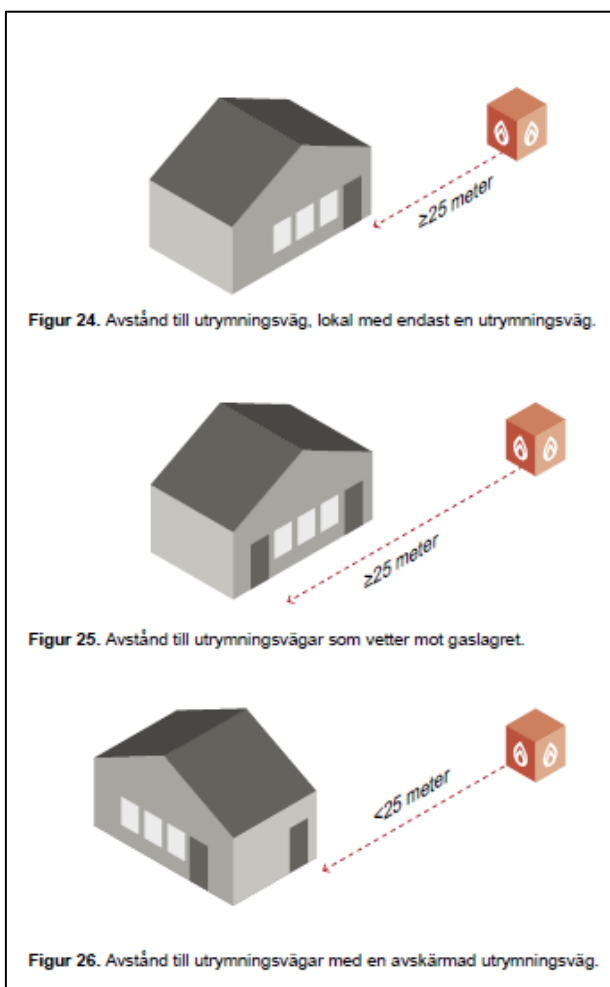
Kompressorbyggnaden har betraktats som *behållare med hög motståndskraft*, då installationerna i denna i huvudsak är stål, och dessutom skyddade av byggnadens väggar, vilket får anses konservativt.

Avstånd mellan gaslager och luftintag till *Byggnad i allmänhet* är baserat på en gasspridning från läckage vid gaslagret.

2.3.2 Utrymningsvägar

Avstånd gällande utrymningsvägar från byggnad i allmänhet har baserats på avstånd som gäller för *Enstaka personer, tredjeperson*.

Fotnot a) gällande avstånd från utrymningsvägar från *Byggnad i allmänhet* baseras på samma resonemang som i MSB:s handbok *Hantering av brandfarlig gas för yrkesmässig verksamhet*. Där anges att avståndet gäller den kortaste sträcka som bör finnas mellan gaslagret och den utrymningsväg som ligger längst bort från gaslagret. Om minst en utrymningsväg är avskärmd från gaslagret, till exempel om den ligger på andra sidan om en byggnad, behövs inget avstånd till övriga utrymningsvägar. Observera att avståndet mellan byggnaden och gaslagret ändå gäller. En utrymningsväg kan också vara avskärmd med en mur eller liknande. Figuren nedan kommer från MSB:s handbok.



Figur 2-1 Avstånd till utrymningsvägar för byggnad i allmänhet (från MSB:s handbok *Hantering av brandfarlig gas för yrkesmässig verksamhet*, MSB1589)

Ovanstående resonemang bedöms dock inte gälla för *Utrymningsvägar från samlingslokaler*, eftersom ett större antal personer kan behöva ta sig ut, och de har därför inte samma möjlighet att välja en alternativ utgång.

Fotnot c) gällande reduktionen till $\frac{1}{4}$ med EI 30 har baserats på *halva flamlängden* enligt MSB:s rapport. Halva flamlängden motsvarar ungefär $\frac{1}{4}$ av de angivna värdena. Detsamma gäller fotnot f) i tabell 5.3, för avstånd till *Enstaka person*.

Avstånd för *Utrymningsvägar från samlingslokaler* har reducerats baserat på att heta gaser från en jetflamma stiger vid ett visst avstånd. För aktuella rörstorlekar och tryck enligt denna rapport (dvs. upp till 12 mm innerdiameter och 1000 bar) inträffar detta vid maximalt 45 m vilket gör att avståndet har begränsats till detta avstånd.¹ Reduktion av avstånd med brandteknisk avskiljning för *Utrymningsvägar från samlingslokaler* baseras på reduktion av avstånd mot *folksamling*, enligt tabell 20 i MSB:s rapport.

2.3.3 Kompressorbyggnad

För avstånd från kompressorbyggnad har avstånden baserats på utsläpp vid 1000 bar och 12 mm innerdiameter med isoleringsmöjlighet (enligt tabell 9 i MSB:s rapport). För de fall då avståndet baseras på en gasspridning (enligt tabell 8 i MSB:s rapport) har avståndet reducerats med 50 % i enlighet med avsnitt 2.1.7.

2.3.4 Vätgasdispenser

För avstånd till *byggnad i allmänhet* har brand i byggnad varit dimensionerande. Avstånd för påverkan mot *behållare med hög motståndskraft* har använts. Här är resonemanget att slangen (som inte kan anses ha *hög motståndskraft*) inte behöver beaktas. Om denna smälter så sker ett mindre utsläpp, men övriga komponenter antas ha *hög motståndskraft* och förhindrar ytterligare utsläpp då dispensern isoleras från övriga gassystemet. När inget fordon tankar är dessutom slangen i stort sett trycklös och isolerad från övriga gassystemet.

¹ Enligt mailkorrespondens med Marcus Runefors, LTH, 2023-05-16. Detta förväntas beskrivas närmare i den slutliga versionen av MSB:s rapport.

2.4 Tabell 5.3 Avstånd mellan anläggning och annan verksamhet

Avstånden i tabell 5.3 baseras på MSB:s rapport. Avstånd i gröna rutor är baserade på påverkan från objekt i den vänstra, gröna kolumnen (dvs. vätgasininstallationerna), avstånd i blå rutor är baserade på påverkan från objekt i den översta, blå raden.

Tabell 5.3 Avstånd mellan anläggning och annan verksamhet

Anläggningsdel	Personbilar, parkerade	Lastbilar och andra tyngre fordon, parkerade	Stor mängd brännbart material	Folksamling, tredjeperson	Enstaka personer, tredjeperson
	(meter)	(meter)	(meter)	(meter)	(meter)
Kompressorbyggnad	2 ^{a, b}	6 ^{a, c}	9 ^a	42 ^d	28 ^f
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, komposit	6,2 ^{a, b}	12 ^{a, c}	19 ^a	45 ^e	23 ^f
Mobilt gaslager ≤ 500 bar, stål	6,2 ^{a, b}	6,2 ^{a, c}	9 ^a	45 ^e	23 ^f
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, komposit	7,7 ^{a, b}	12 ^{a, c}	19 ^a	45	28 ^f
Stationärt gaslager ≤ 1 000 bar, stål	7,7 ^{a, b}	7,7 ^{a, c}	9 ^a	45	28 ^f
Vätagasdispenser	2 ^{a, b}	6 ^{a, c}	9 ^a	23 ^d	15 ^f

- a) Avståndet kan minskas till hälften med brandteknisk avskiljning minst EI 60 enligt avsnitt 2.1.5. För kompressorbyggnad kan denna avskiljning utgöras av byggnadens vägg. För *Stor mängd brännbart material* ska siktningslinjen räknas till 5 meter över högsta punkt på det brännbara materialet.
- b) För parkeringsplatser vid köpcentrum och liknande, där människor kan förväntas röra sig relativt frekvent, används i stället avstånd för *Enstaka personer, tredjeperson*.
- c) För fordon där människor förväntas övernatta, exempelvis uppställningsplats för lastbilar eller campingplatser, används i stället avstånd för *Enstaka personer, tredjeperson*.
- d) Avståndet kan minskas till 14,0 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).
- e) Avståndet kan minskas till 35,6 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).
- f) Avståndet kan minskas till ¼ med brandteknisk avskiljning minst E 30 enligt avsnitt 2.1.5 (för påverkan mot människor).

2.4.1 Parkerade fordon

Med bakgrund av att parkerade fordon är att betrakta som parkeringsplatser eller motsvarade där personer från allmänheten enbart kortvarigt kommer att uppehålla sig bedöms riskerna vara begränsade. För ett vätagasläckage baseras dessa avstånd på samma avstånd som gäller till

byggnad i allmänhet, men avståndet blir i flera fall i stället dimensionerade av en brand i fordonet (vilket framgår av färgkodningen i tabell 5.3).

Undantag till ovanstående kan vara parkeringsplatser vid stormarknader och liknande, där människor kan förväntas röra sig relativt frekvent. Då gäller i stället avstånd för *enstaka personer*.

För fordon där människor förväntas övernatta, exempelvis uppställningsplats för lastbilar eller campingplatser, behöver även påverkan från vätgashantering beaktas. Då används i stället avstånd för *enstaka personer*.

För tankande fordon, se tabell 5.1 samt avsnitt 2.2.3.

2.4.2 Vätgasdispenser

Avståndsbedömningen för dispensern följer samma resonemang som i avsnitt 2.3.4.

2.4.3 Stor mängd brännbart material

För *stor mängd brännbart material* har avstånden baserats på tabell 13 och 14 i MSB:s rapport, där de längsta avstånden har använts. Kompressorbyggnaden har betraktats som *behållare med hög motståndskraft*, då installationerna i denna i huvudsak är stål, och dessutom skyddade av byggnadens väggar, vilket får anses konservativt.

2.4.4 Kompressorbyggnad

För avstånd från kompressorbyggnad har avstånden baserats på utsläpp vid 1000 bar och 12 mm innerdiameter med isoleringsmöjlighet (enligt tabell 9 i MSB:s rapport).

2.4.5 Folksamling

Avstånd för *Folksamling* har reducerats baserat på att heta gaser från en jetflamma stiger vid ett visst avstånd. För aktuella rörstorlekar och tryck enligt denna rapport (dvs. upp till 12 mm innerdiameter och 1000 bar) inträffar detta vid maximalt 45 m vilket gör att avståndet har begränsats till detta avstånd.²

² Enligt mailkorrespondens med Marcus Runefors, LTH, 2023-05-16. Detta förväntas beskrivas närmare i den slutliga versionen av MSB:s rapport.

2.5 Tabell 5.4 Avstånd vid samlokalisering med andra drivmedel

Avstånden i tabell 5.4 baseras på MSB:s rapport, avståndstabeller i TSA 2020 samt MSB:s handbok *Hantering av brandfarliga gaser och vätskor på bensinstationer* (publ. nr. MSB822). Avstånd i blå rutor är baserade på påverkan från objekt i den vänstra, blå kolumnen, avstånd i gröna rutor är baserade på påverkan från objekt i den översta, gröna raden (dvs. vätgasininstallationerna).

För avstånd som baseras på TSA 2020 lämnas rutorna ofärgade då det saknas uppgifter om exakt vad de baserats på. Om de skulle baseras på utsläpp med vätgas skulle avstånden bli kortare.

Avstånd inom parentes avser avstånd till kompressorbyggnadens luftintag. Avståndet före parentes är till byggnaden i övrigt.

Tabell 5.4 Avstånd vid samlokalisering med andra drivmedel

Annan verksamhet	Vätgasdispenser	Kompressorbyggnad, vätgas (luftintag)	Mobilt gaslager, vätgas ≤ 500 bar	Stationärt gaslager, vätgas ≤ 1 000 bar
	(meter)	(meter)	(meter)	(meter)
CNG-lager ≤ 250 bar, komposit	12,4 ^a	6,2 (13,7) ^a	34 ^b	42 ^c
CNG-lager ≤ 250 bar, stål	8,3 ^a	6,2 (13,7) ^a	23 ^b	28 ^c
CNG-dispenser	-	6 ^a	12 ^a	12 ^a
LNG-cistern >100 m ³ , ≤450 m ³	8,3 ^a	25 ^a	50 ^a	50 ^a
LNG-cistern ≤100 m ³	8,3 ^a	12 ^a	25 ^a	25 ^a
LNG-dispenser	-	6 ^a	6 ^a	6 ^a
Mätarskåp (pump) för brandfarlig vätska med flampunkt högst 30 °C	-	3	6 ^a	6 ^a
Cistern ovan mark med brandfarlig vätska (stål) ^d	8,3 ^a	15,3 ^a	25 ^a	28 ^c
Laddstation för elfordon	6 ^a	6 ^a	6 ^a	6 ^a

- a) Avståndet kan minskas till hälften med brandteknisk avskiljning minst EI 60 enligt avsnitt 2.1.5. För kompressorbyggnad kan denna avskiljning utgöras av byggnadens vägg. För kompressorbyggnad kan avståndet till luftintag ignoreras med lämplig tät barriär.
- b) Avståndet kan minskas till 5,6 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5.
- c) Avståndet kan minskas till 7,0 meter med brandteknisk avskiljning minst E 60 enligt avsnitt 2.1.5.
- d) För cistern under mark med brandfarlig vätska behövs inget skyddsavstånd. Om cisternen har invallning räknas avståndet till invallningen.

2.5.1 CNG-lager

För CNG-lager har samma avstånd använts som för mellan vätgaslager enligt tabell 5.1. Det förutsätts att påverkan från CNG-lagret ger kortare avstånd än för påverkan från vätgaslagret, eftersom CNG hanteras vid lägre tryck (upp till 250 bar enligt TSA 2020). Här har därför 250 bar satts som gräns för när avstånden är giltiga. Eftersom läckaget baseras helt på vätgashanteringens så beror avståndet för vätgaslagren endast på trycket och inte på vätgaslagrets material.

För kompressorbyggnaden har avståndet baserats ett utsläpp från CNG-lagret, vilket här representeras av ett vätgasutsläpp för 500 bar och 12 mm enligt MSB:s rapport, vilket alltså bedöms konservativt, eftersom ett utsläpp från ett gaslager för metan vid 250 bar blir kortare.

2.5.2 CNG-dispenser

Avstånden för CNG-dispenser har baserats på tabell 5.1 i TSA 2020 (vilket kan antas vara baserat på påverkan från CNG-dispensern). Kompressorbyggnaden betraktas som *byggnad i allmänhet* (enligt avsnitt 2.1.7) och gaslager som *stor mängd brännbart material*. Det sistnämnda kan också jämföras med avstånd mellan vätgasdispenser och gaslager enligt tabell 5.1, vilket är 12,4 meter (för komposit). Här är avståndet 12 meter, vilket får anses konservativt då trycket är betydligt lägre. Avstånd mellan CNG-dispenser och vätgasdispenser betraktas här på samma sätt som avstånd mellan vätgasdispensrar enligt avsnitt 2.2.3.

2.5.3 LNG-cistern

För avstånd mellan LNG-cistern och vätgasanläggningen används samma avstånd som gäller för LNG-cistern enligt tabell 8.1 i TSA 2020, förutom för vätgasdispensern, där LNG-cisternen betraktats som *behållare med hög motståndskraft*. Kompressorbyggnaden betraktas som *byggnad i allmänhet* (enligt avsnitt 2.1.7) i tabellen i TSA 2020. Enligt TSA 2020 får en dubbelmantlad LNG-cistern betraktas som brandtekniskt avskild i klass EI 60, förutsatt att även cisternens ben är brandskyddade i motsvarande EI 60.

2.5.4 LNG-dispenser

För avstånd mellan LNG-dispenser och vätgasanläggningen används samma avstånd som gäller för LNG-dispenser enligt tabell 8.1 i TSA 2020. Kompressorbyggnaden betraktas som *byggnad i allmänhet* i tabellen i TSA 2020. Avstånd mellan LNG-dispenser och vätgasdispenser betraktas här på samma sätt som avstånd mellan vätgasdispensrar enligt avsnitt 2.2.3.

2.5.5 Mätarskåp och cistern för brandfarlig vätska

Avstånd mellan mätarskåp respektive cistern för brandfarlig vätska och vätgasanläggningen har antingen baserats på avstånd enligt tabell 8.1 i TSA 2020 eller avstånd baserade på påverkan från vätgasläckage mot gaslager. En skillnad mot TSA 2020 är här att avståndet uttryckligen endast gäller cistern för brandfarlig vätska av stål, och att avståndet får gälla oavsett vätskans flampunkt. För cisterner av plast krävs större avstånd, men de hanteras inte i denna rapport. Det är rimligt att även cisterner med vätskor med högre flampunkt skyddas, eftersom avståndet baseras på en jetflamma från vätgasininstallationen.

För kompressorbyggnad och mätarskåp har avståndet baserats på MSB:s handbok *Hantering av brandfarliga gaser och vätskor på bensinstationer* (publ. nr. MSB822). Där har avstånd mellan mätarskåp och *Förrådsbyggnad med stor brandbelastning* använts.

Avstånd mellan mätarskåp och vätgasdispenser betraktas här på samma sätt som avstånd mellan vätgasdispensrar enligt avsnitt 2.2.3.

2.5.6 Laddstation för elfordon

Avstånd till laddstation för elfordon är baserade på en bedömning från arbetsgruppen för H₂-TSA 2023 och anses vara väl tilltagna utan ytterligare beräkningar.

Referenser

- /1/ Gexcon, *Consequence analysis for hydrogen fueling station*, Gexcon doc. no. Gexcon-22-F101542-RA-1, Rev. 01, March 2023
- /2/ Ehrhart, B., Hecht, E., *Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0 Technical Reference Manual*, SAND2022-16425, November 2022, Sandia National Laboratories
- /3/ Runefors, M. (2023) *Förslag till skyddsavstånd för vätgasinstallationer*, publ. nr MSB2186, utkast daterat 2023-03-28, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
- /4/ Hidalgo et al, *A framework for evaluating the thermal behaviour of carbon fibre composite materials*, School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh, 2015
- /5/ Fischer et al, *Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor*, Försvarets forskningsanstalt, 1998
- /6/ Kotchourko, A., Jordan, T., *Hydrogen Safety for Energy Applications, Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards*, hySafe, 2022
- /7/ Molkov, V., *Fundamentals of Hydrogen Safety*, 2012

Bilaga A - Läckage i kompressorbyggnad

I Gexcon:s rapport redovisas bland annat avstånd vid läckage i kompressorbyggnad och i det fria. Dessa avstånd har jämförts i syfte att bedöma hur avstånd kan reduceras när de sker i en kompressorbyggnad jämfört med i det fria.

De läckage i kompressorbyggnad (*inside compressor container*) och utomhus (*outdoors*) som använts är *small leakage* (0,5 mm²) och *large leakage* (28,3 mm²), som är läckage vid 1000 bar. De scenarion som valts är avstånd till 4 % och 8 % vid oantänt gasutsläpp, och 4 kW/m², 12,5 kW/m² och 37,5 kW/m² för påverkan genom värmestrålning från jetflamma. Resultaten antas kunna vara representativa även för andra utsläpp och typer av påverkan.

	Gränsvärde	Container	Outside	Reduktion
<i>Small leakage</i>	2%	5 m	22 m	0,23
<i>Large leakage</i>	2%	81 m	124 m	0,65
<i>Small leakage</i>	4%	5 m	15 m	0,33
<i>Large leakage</i>	4%	27 m	76 m	0,36
<i>Small leakage</i>	8%	5,2 m	3,6 m	1,44
<i>Small leakage</i>	4 kW/m ²	5,4 m	6,6 m	0,82
<i>Large leakage</i>	4 kW/m ²	33 m	35 m	0,94
<i>Small leakage</i>	12,5 kW/m ²	4,9 m	6,4 m	0,77
<i>Large leakage</i>	12,5 kW/m ²	25 m	30 m	0,83
<i>Small leakage</i>	37,5 kW/m ²	4,6 m	5,6 m	0,82
<i>Large leakage</i>	37,5 kW/m ²	18 m	28 m	0,64

Reduktionen visar sig vara som störst för de oantända utsläppen, dvs. för gasspridning. En faktor 0,5 antas kunna användas för sådana scenarion, dvs. en reduktion med 50 % av det framräknade avståndet för ett utsläpp i det fria. För *large leakage* vid 2 % är detta inte tillräckligt, men inga av avstånden i tabell 5.1-5.4 som baseras på gasspridning utgår från ett sådant stort läckage (dvs. läckage från ett totalt rörbrott). För *small leakage* vid 8 % blev avstånden längre vid utsläpp i containern. Orsaken till detta beror sannolikt på ett skrivfel, men eftersom avstånden är relativt korta så är bedömningen att detta avvikande resultat inte behöver beaktas. För *large leakage* saknades avstånd vid 8 %.

För reduktion vid påverkan genom värmestrålning vid ett antänt läckage blir reduktionen varierande och inte lika stor. Någon reducerande faktor har därför inte applicerats på dessa avstånd. Troligtvis kan sådana avstånd förkortas, exempelvis kan de i många fall räknas från öppningar i kompressorbyggnaden i stället för från byggnadens ytterväggar.

Bilaga B - Skydd mellan mobila gaslager

Dessa beräkningar är avsedda att visa att avstånd mellan två mobila gaslager (kompositbehållare) med maxtryck 500 bar inte behövs med mur i brandteknisk avskiljning EI 60 som är minst 1 m högre än gaslagren. En förutsättning är dock ett avstånd på cirka 1 meter mellan muren och varje gaslager. Läckagepunkten antas vara placerad en bit in i lagrets konstruktion, 20 cm in från sidan och 20 cm ovanifrån. Den hamnar därmed 1,2 m från muren i sidled och 1,2 m lägre än toppen på muren. Den mottagande kompositbehållaren antas också vara placerad en bit in i lagrets konstruktion, 20 cm ovanifrån, men i sidled antas avståndet vara 1 m från muren (för att kompensera för att kompositbehållarens mantelyta kan befinna sig närmare i jämförelse med läckagepunkten).

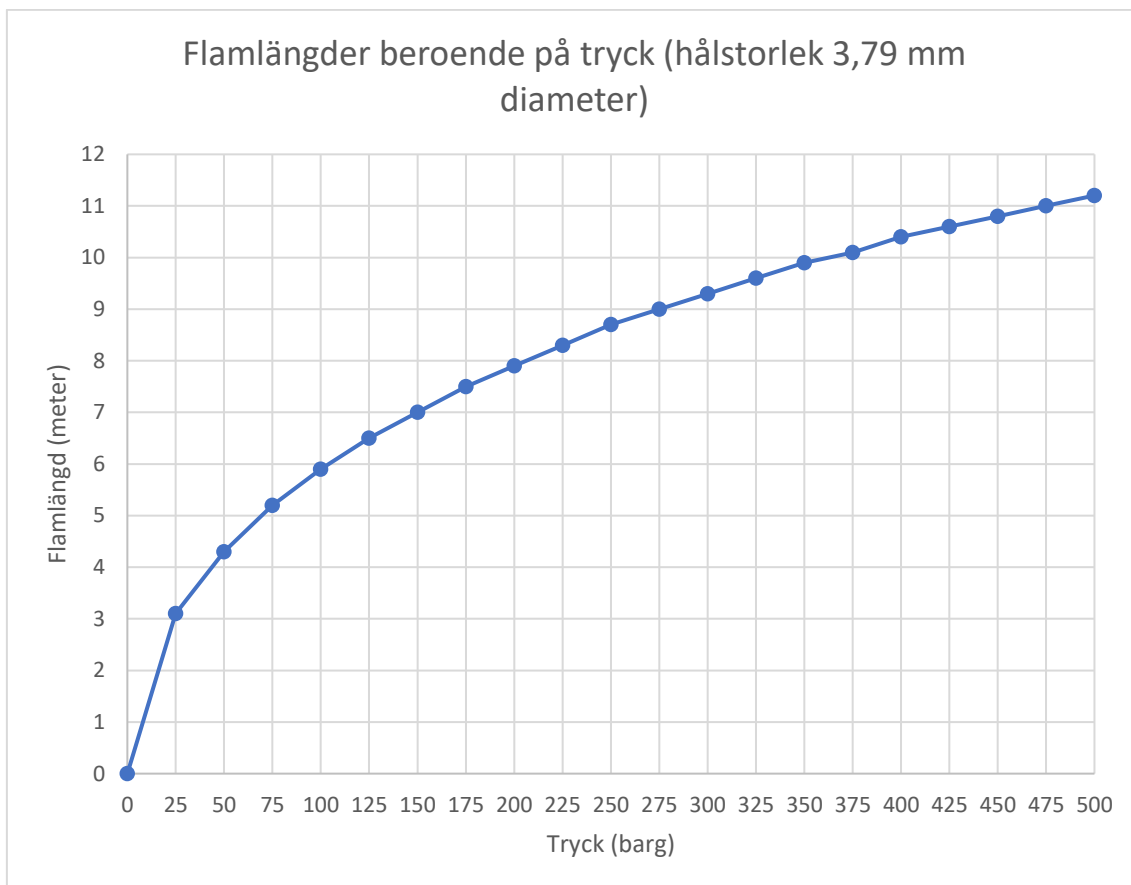
Beräkningarna gäller ett läckage genom ett skarpkantat hål med area motsvarande 10 % av innerarean av ett rör med innerdiameter 12 mm. Detta ger ett cirkulärt hål med arean 11,3 mm². Läckaget sker från en behållare med volym 5000 liter, eftersom mobila gaslager enligt H₂-TSA 2023 ska ha automatisk avstängning av sektioner, där varje sektion får ha en maximal volym av 5000 liter. Detta motsvarar 158 kg vätgas vid 500 bar och 15 °C.

Massflöde, återstående massa, tryck och flamlängd har beräknats minut för minut under 30 minuter. Massflödet ger en minskning av massan och därmed trycket, vilket i sin tur minskar flamlängden. Den värmestrålning som träffar det andra gaslagret baseras på den del av flamman som skjuter över muren. På så vis kan infallande värmestrålning beräknas minut för minut, vilket har jämförts med experimentella försök med värmestrålning mot kompositbehållare enligt Ref /4/.

Flamlängder

Flammans längd vid tryck upp till 500 bar(g) med intervaller om 25 bar har erhållits från Marcus Runefors, LTH³. Dessa har plottats enligt figur B-1 nedan i syfte att ta fram flamlängder vid olika tryck.

³ E-post daterat 2023-05-23, kl 16:18.



Figur B-1 Flamlängder beroende på tryck

Beräkning av massflöde

Massflödet (kg/s) har beräknats enligt Ref /5/; specifika gaskonstanten har beräknats enligt formel [4:9], rörelsemängdsflödet enligt [4:19] och massflödet enligt formel [4:18].

Temperaturen har satts till 288 K (15 °C) och förloppet antas ske isotermiskt. I själva verket kan temperaturen sjunka något, vilket då resulterar i ett lägre tryck och därmed lägre massflöde, så detta antagande bedöms vara konservativt. Kontraktionsfaktorn har satts till 0,7, vilket motsvarar ett skarpkantat hål. Detta anses vara ett konservativt val, då ett läckage snarare kan förväntas ske vid en otät koppling där denna faktor sannolikt är lägre. Valet ligger dock i linje med vad som anges i litteraturen och andra källor.

I figur B-2 nedan visas exempel på beräkning vid 500 bar.

Gasutsläpp från cirkulärt hål, kritisk strömning

Tryck i behållaren (övertryck)	P	500	bar(g)
Tryck i behållaren (absolut)	P_0	50101300	Pa(a)
Atmosfärstryck	P_a	101300	Pa(a)
Temperatur i behållaren	T_0	288	K
Molmassa	M	2,016	kg/kmol
Universella gaskonstanten	R^*	8314	J/kmol*K
Specifik gaskonstant	R	4124,01	J/kg*K
Rördiameter (inner)	D_i	0,012	m
Innerarea	A_i	0,000113	m ²
Dimensionerande utsläpp (andel av area)		0,1	
Utsläppsarea	A	1,131E-05	m ²
Kontraktionsfaktor	C_d	0,7	-
Rörelsemängdsflöde	F	498,97	N
Massflöde	Q	0,243	kg/s

Figur B-2 Beräkning av massflöde från läckagepunkt

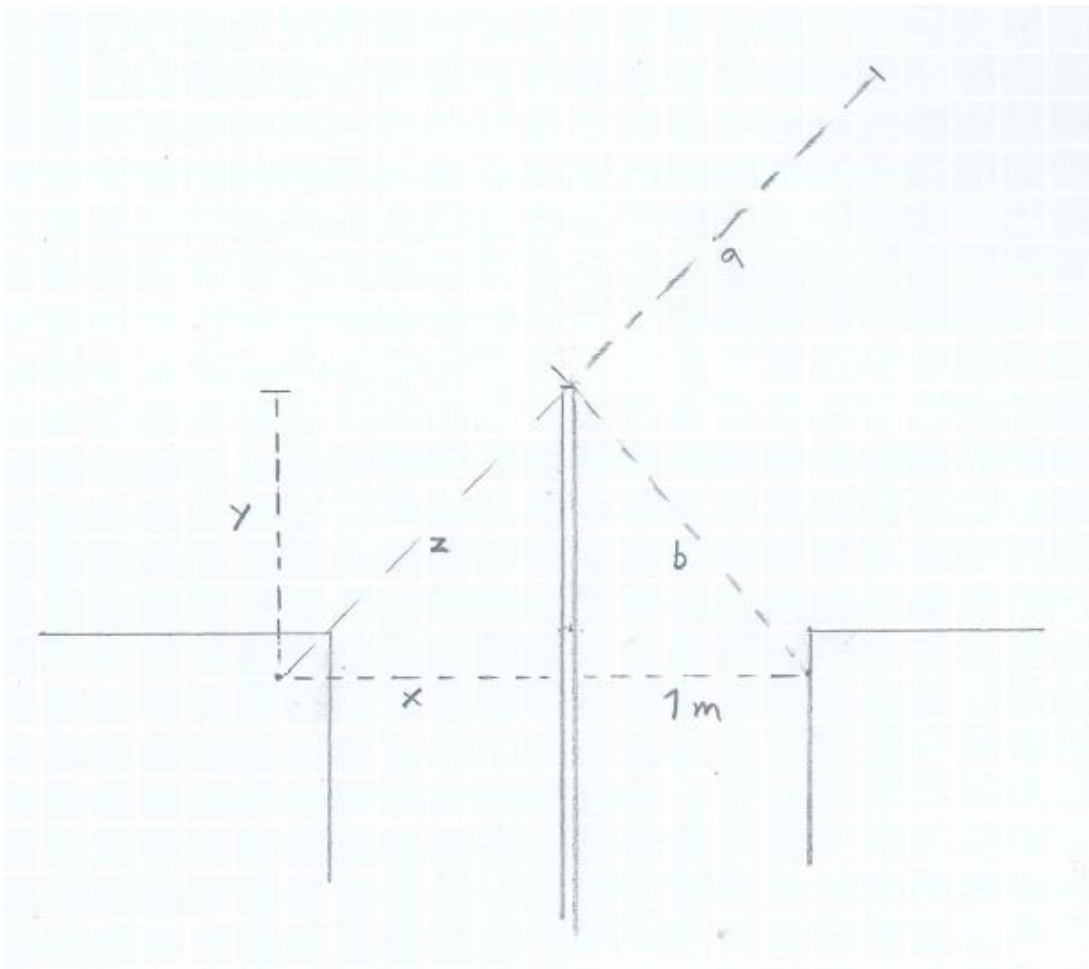
Beräkning av utgående och infallande värmestrålning

Utgående värmestrålning beräknas genom att räkna fram en effektutveckling (kW) utgående från beräknat massflöde (kg/s) enligt ovan multiplicerat med lägre förbränningsvärmets (LHV, kJ/kg) och förbränningseffektiviteten, som antas vara 1 (dvs. all vätgas förbränns). Flamman antas ta formen av en cylinder, och en utgående värmestrålning (kW/m²) kan därmed beräknas utifrån effektutvecklingen multiplicerat med strålningsandelen delat på cylinderns area.

Strålningsandelen, alltså den andel energi som omsätt till värmestrålning, sätts till 0,1 enligt Ref /6/. Cylinderns radie har beräknats utifrån flammans längd enligt formel [11:9] i Ref /5/.

Transmissionsförmågan visar hur mycket värmestrålning som absorberas av vatten och koldioxid i luften, och har uppskattats till 0,97 utifrån figur 11.2 och formel [11:13] i Ref /5/.

Flammans överskjutande del över muren (a) beräknas genom att ta flamlängden (L) enligt figur B-1 ovan och dra av hypotenusan (z) för den triangel som bildas från läckagepunkten till murens topp. Triangelns kateter utgörs av avståndet från läckagepunkt till mur ($x=1,2$ m) samt höjdskillnad mellan läckagepunkt och mur ($y=1,2$ m). Avståndet från flammen och den mottagande punkten blir hypotenusan (b) på andra sidan muren, där avståndet mellan denna punkt och muren enligt ovan satts till 1 m. Se figur B-3 nedan.



Figur B-3 Skiss över beräknade avstånd

Infallande värmestrålning beräknas från utgående värmestrålning från flammans överskjutande del, multiplicerat med maximala vinkelkoefficienten samt transmissionsförmågan.

Vinkelkoefficienten beräknas enligt formel [11:14] till och med formel [11:20] i Ref /5/.

Figur B-4 nedan visar ett exempel på en sådan beräkning för en flamma med längd 11,2 meter (vid 500 bar).

Strålande objekt: Cylinder (jetflamma)

Längd flamma	L	11,2	m
Höjd på mur över läckagepunkt	y	1,2	m
Avstånd mellan mur och läckagepunkt	x	1,2	m
Hypotenusa till murens mittpunkt	z	1,697	m
Överskjutande längd flamma	a	9,503	m
Radie cylinder	R	0,840	m
Cylinders yta	A_c	63,55	m ²
Avstånd flamma till närmsta punkt	b	1,56	m
	h_r	11,313	
	x_r	1,860	
	A	136,162	
	B	128,723	
Horisontell vinkelk.	F_h	0,179	
Vertikal vinkelk.	F_v	0,269	
Max vinkelkoefficient	F_{max}	0,323	
Massflöde	Q	0,243	kg/s
Förbränningsvärme (LHV)	H_c	120000	kJ/kg
Förbränningseffektivitet		1	
Effektutveckling		29130,67166	kW
Strålningsandel		0,1	
Strålning från yta	H_o	45,84	kW/m ²
Abs.faktor H ₂ O	α_w	0,02	
Abs.faktor CO ₂	α_c	0,01	
Transmissionsförmåga	τ_a	0,97	
Infallande strålning	H_i	14,37	kW/m ²

Figur B-4 Beräkning av infallande värmestrålning

Beräkning av infallande värmestrålning över tid

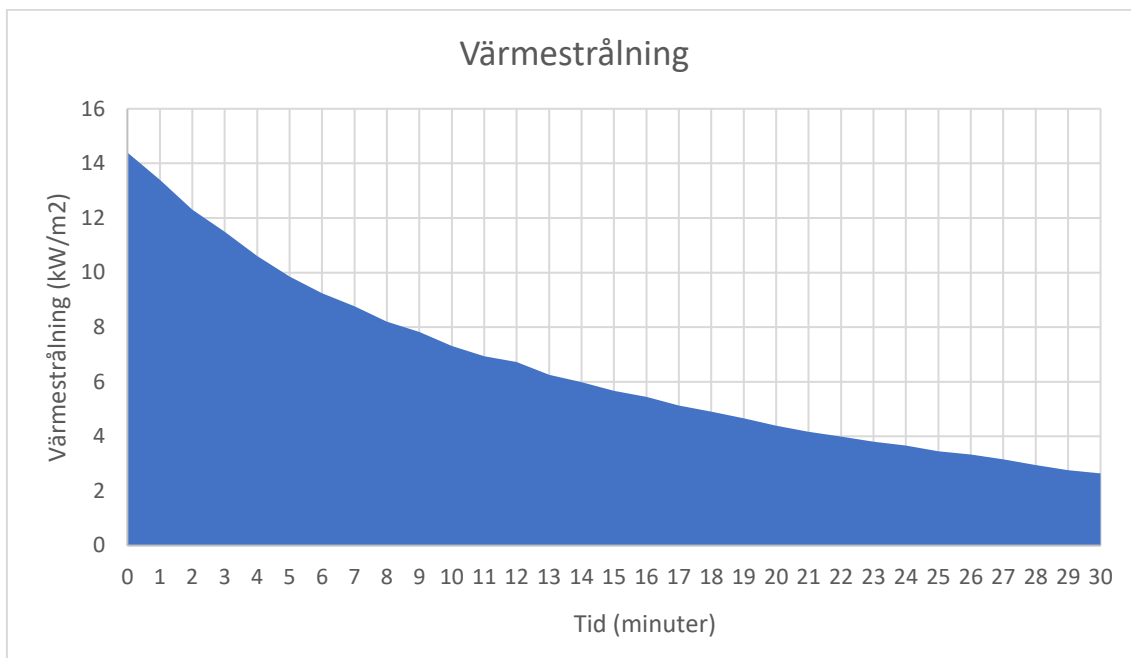
Värmestrålningen över tid har beräknats enligt ovan utifrån det fallande trycket minut för minut.

Massflödet i kg/s avgör hur mycket gas som läckt ut under en minut, vilket i sin tur ger en återstående massa i kg för nästa minut. Den lägre massan ger i sig ett lägre tryck, som blir grunden för nästa beräkning av värmestrålning. För varje ny beräkning har en ny kompressibilitetsfaktor Z beräknats enligt formel (2-8) i Ref /7/. Denna har beräknats utifrån trycket från föregående minut, eftersom trycket för aktuell minut är beroende av kompressibilitetsfaktorn i sig. Detta får en viss konservativ effekt.

Resultatet av dessa beräkningar redovisas i figur B-5 nedan. Under denna presenteras en graf (figur B-6) som visar hur infallande värmestrålning sjunker med tiden.

T (min)	P (bar)	m (kg)	Z	Q (kg/s)	T (K)	L (m)	H _i (kW/m ²)
0	500	158	1,324	0,243	288	11,2	14,4
1	451	143,4	1,324	0,219	288	10,8	13,4
2	400	130,3	1,292	0,194	288	10,4	12,3
3	355	118,6	1,259	0,172	288	9,9	11,5
4	316	108,3	1,230	0,154	288	9,5	10,6
5	284	99,1	1,205	0,138	288	9,2	9,9
6	255	90,8	1,184	0,124	288	8,8	9,2
7	231	83,3	1,165	0,112	288	8,4	8,8
8	209	76,6	1,149	0,102	288	8,1	8,2
9	190	70,5	1,135	0,093	288	7,7	7,8
10	173	64,9	1,123	0,084	288	7,5	7,3
11	158	59,9	1,112	0,077	288	7,2	6,9
12	145	55,2	1,102	0,071	288	6,8	6,7
13	133	51,0	1,094	0,065	288	6,7	6,3
14	122	47,1	1,086	0,059	288	6,4	6,0
15	112	43,6	1,079	0,055	288	6,2	5,7
16	103	40,3	1,072	0,050	288	5,9	5,5
17	94	37,3	1,066	0,046	288	5,7	5,1
18	87	34,5	1,061	0,043	288	5,5	4,9
19	80	31,9	1,056	0,039	288	5,3	4,7
20	74	29,6	1,052	0,036	288	5,2	4,4
21	68	27,4	1,048	0,034	288	5,0	4,2
22	63	25,4	1,044	0,031	288	4,8	4,0
23	58	23,5	1,041	0,029	288	4,6	3,8
24	54	21,8	1,038	0,027	288	4,4	3,7
25	50	20,2	1,035	0,025	288	4,3	3,5
26	46	18,7	1,032	0,023	288	4,0	3,3
27	43	17,4	1,030	0,021	288	3,9	3,2
28	39	16,1	1,028	0,020	288	3,7	3,0
29	36	14,9	1,025	0,018	288	3,6	2,8
30	34	13,9	1,024	0,017	288	3,5	2,6

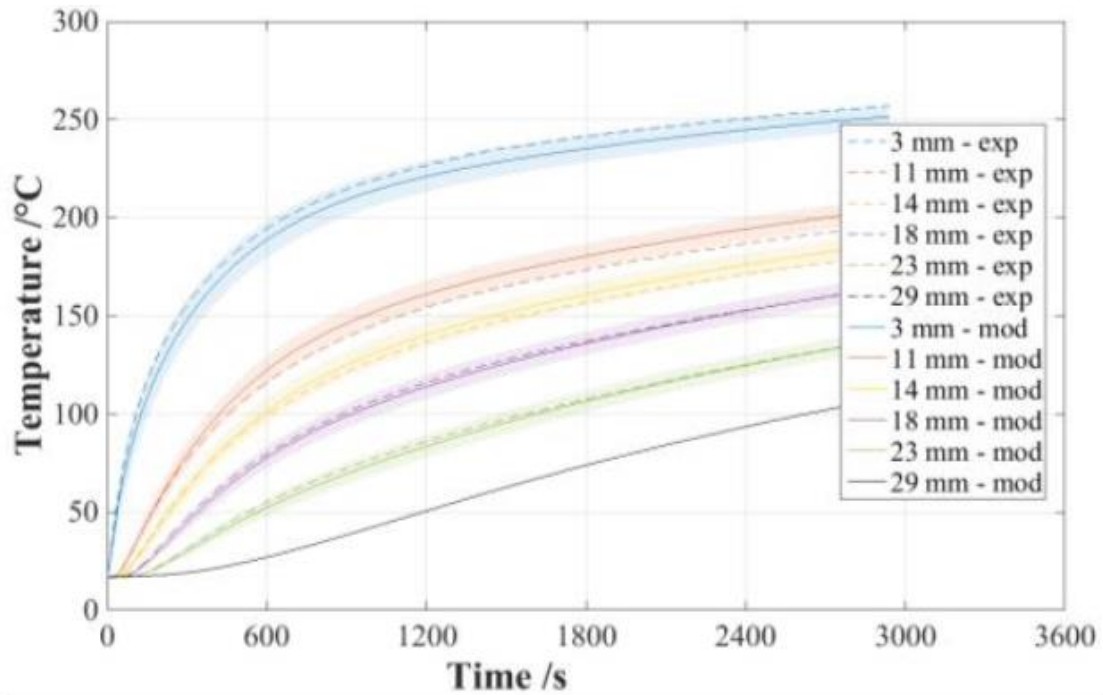
Figur B-5 Beräkningsresultat av infallande värmestrålning vid fallande tryck



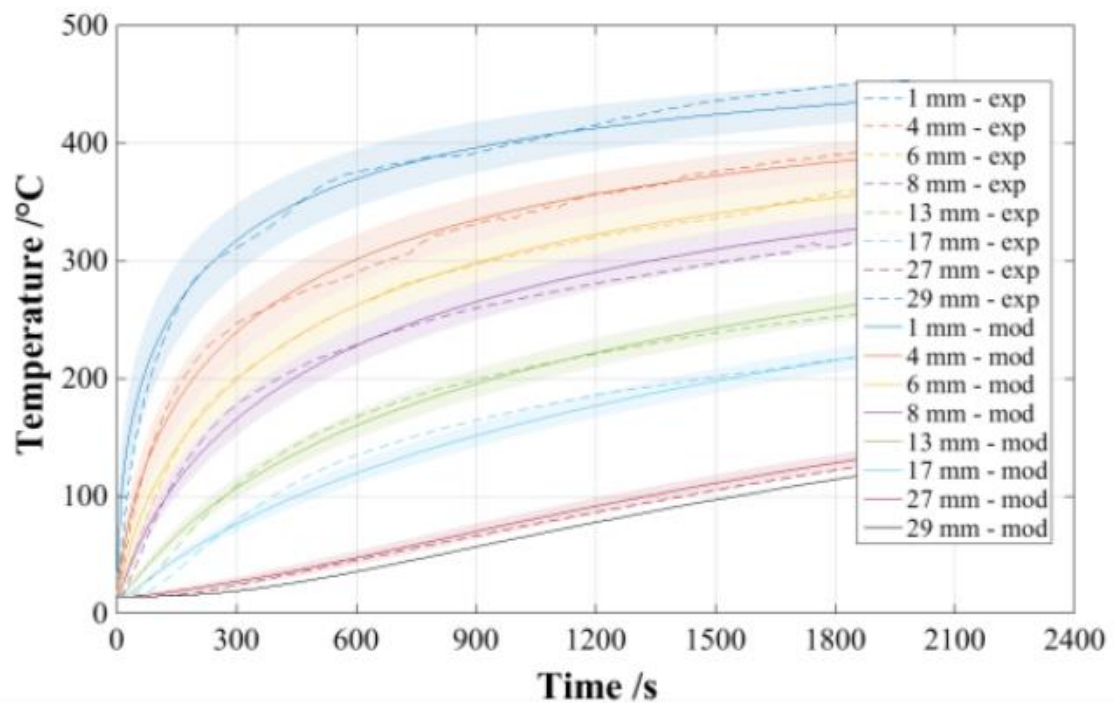
Figur B-6 Infallande värmestrålning under 30 minuter

Värmepåverkan mot kompositbehållare

Ref /4/ visar att kompositmaterial är opåverkat efter att ha utsatts för en värmestrålning av 10 kW/m² i över 30 minuter, men att det inte klarar 30 kW/m² under samma tidsperiod. Materialet bryts då ned genom pyrolys och förstörs, vilket kan leda till eskalering vid en brand genom att gasbehållarna exploderar. Figur 6 och 7 från Ref /4/ (figur B-7 och B-8 nedan) visar temperaturen på olika djup inuti materialet vid dessa försök. Den första grafen (figur B-7) visar att kompositmaterialet klarar en temperatur av minst 250 °C i en punkt 3 mm in i materialet. Detta används som gränsvärde. Sannolikt klarar materialet betydligt högre temperaturer, särskilt med avseende på att dessa komposittankar är flera centimeter tjocka. Vidare saknas information om vad som sker i intervallet mellan 10 kW/m² och 30 kW/m². Materialet kan mycket väl klara högre värmestrålning än 10 kW/m², men detta har inte undersökts. Gränsvärdet är därmed konservativt valt.



Figur B-7 Experimentella och modellerade temperaturer i kompositmaterial vid 10 kW/m²



Figur B-8 Experimentella och modellerade temperaturer i kompositmaterial vid 30 kW/m²

Jämförande beräkningar

Temperaturer vid 3 mm vid 10 kW/m² har jämförts med temperaturer vid 4 mm vid 30 kW/m². Temperaturerna vid 4 mm och 30 kW/m² har kompenserats med en ökning av 25 °C vilket uppskattas kunna gälla vid 3 mm, i syfte att göra värdena jämförbara. Värdena har uppskattats grovt utifrån graferna ovan minut för minut.

Temperaturförändringen för ett beräknat värmestrålningsvärde vid en viss tid enligt ovan för de första 30 minuterna har räknats fram enligt följande formel:

$$dT_{Hi} = dT_{10} + (dT_{30} - dT_{10}) * \frac{(H_i - 10)}{20}$$

Där: dT_{Hi} = Temperaturförändring vid beräknad värmestrålning, mellan tidpunkt n och tidpunkt $n+1$.

dT_{10} = Temperaturförändring vid värmestrålning 10 kW/m² enligt fig. 6, mellan tidpunkt n och tidpunkt $n+1$.

dT_{30} = Temperaturförändring vid värmestrålning 30 kW/m² enligt fig. 7, mellan tidpunkt n och tidpunkt $n+1$.

H_i = Beräknad infallande värmestrålning, vid tidpunkt n .

Temperaturen vid varje tidpunkt n beräknas sedan som:

$$T_n = T_{n-1} + dT_{pn-1}$$

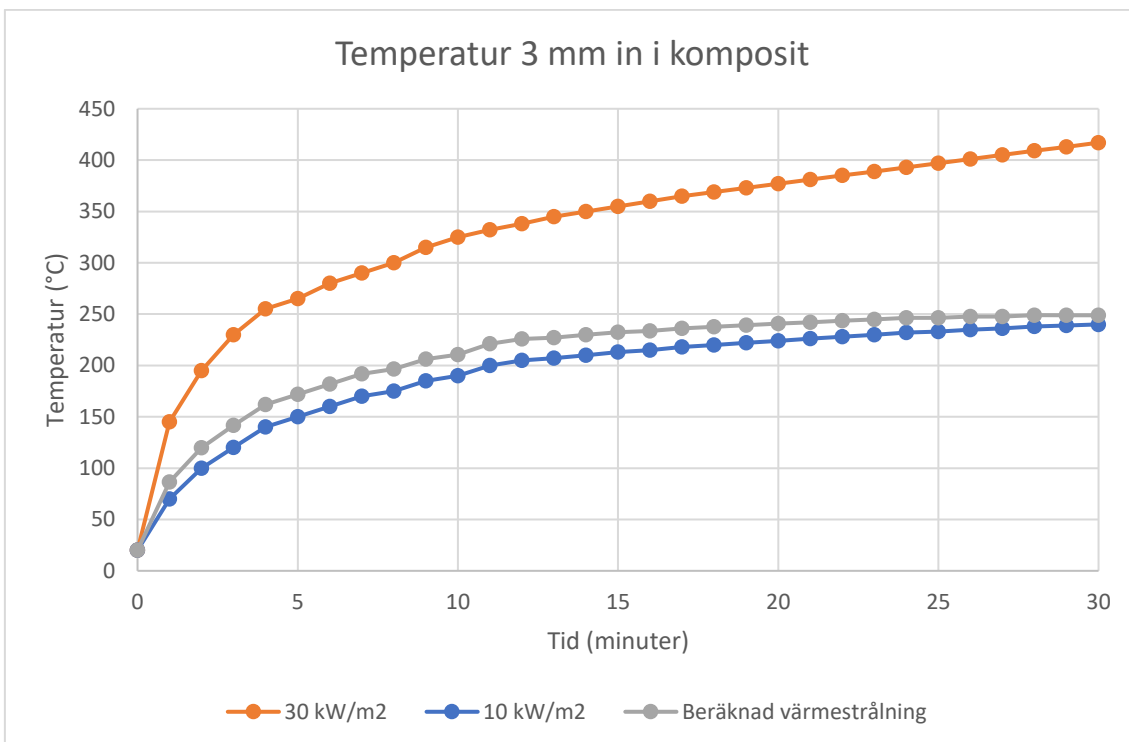
där T för $n=0$ har satts till 20 °C. Tabellen nedan redovisar resultaten av dessa beräkningar.

Sammantaget har tre temperaturkurvor plottats i en gemensam graf, dels för temperaturökning vid en konstant infallande värmestrålning av 10 kW/m² respektive 30 kW/m², dels för den faktiskt beräknade temperaturökningen enligt ovan.

Notera att dT_{Hi} ibland blir högre än föregående värde, trots att värmestrålningen är lägre. Detta beror på osäkerheter i de avlästa värdena ur figur B-6 och B-7. Resultaten bedöms ändå vara tillräckligt tillförlitliga.

n (min)	T ₁₀ 3 mm	T ₃₀ 4 mm	T ₃₀ 3 mm	dT ₁₀	dT ₃₀	H _i (kW/m ²)	dT _{Hi}	T (°C)
0	20	20	20	50	125	14,4	66,5	20
1	70	120	145	30	50	13,4	33,4	87
2	100	170	195	20	35	12,3	21,7	120
3	120	205	230	20	25	11,5	20,4	142
4	140	230	255	10	10	10,6	10,0	162
5	150	240	265	10	15	9,9	10,0	172
6	160	255	280	10	10	9,2	10,0	182
7	170	265	290	5	10	8,8	4,7	192
8	175	275	300	10	15	8,2	9,6	197
9	185	290	315	5	10	7,8	4,5	206
10	190	300	325	10	7	7,3	10,4	211
11	200	307	332	5	6	6,9	4,8	221
12	205	313	338	2	7	6,7	1,2	226
13	207	320	345	3	5	6,3	2,6	227
14	210	325	350	3	5	6,0	2,6	230
15	213	330	355	2	5	5,7	1,4	232
16	215	335	360	3	5	5,5	2,5	234
17	218	340	365	2	4	5,1	1,5	236
18	220	344	369	2	4	4,9	1,5	238
19	222	348	373	2	4	4,7	1,5	239
20	224	352	377	2	4	4,4	1,4	241
21	226	356	381	2	4	4,2	1,4	242
22	228	360	385	2	4	4,0	1,4	244
23	230	364	389	2	4	3,8	1,4	245
24	232	368	393	1	4	3,7	0,0	246
25	233	372	397	2	4	3,5	1,3	246
26	235	376	401	1	4	3,3	0,0	248
27	236	380	405	2	4	3,2	1,3	248
28	238	384	409	1	4	3,0	-0,1	249
29	239	388	413	1	4	2,8	-0,1	249
30	240	392	417	2	4	2,6	1,3	249

Figur B-9 Beräknade temperaturvärden vid fallande värmestrålning under 30 minuter



Figur B-10 Temperaturer i kompositmaterial vid olika infallande värmestrålning

Resultat

Syftet med beräkningarna i denna bilaga var att visa att ett avstånd inte behövs mellan två mobila gaslager (annat än 1 meter mellan mur och varje gaslager), med en mur i minst EI 60 placerad mellan dessa som är minst 1 meter högre än något mobilt gaslager. Figur B-10 ovan visar att temperaturen inte överstiger 250 °C (temperaturen vid 30 minuter är 249 °C). Bedömningen är därmed att en kompositbehållare på ett mobilt gaslager kan klara den infallande värmestrålning som en flamma som tangerar muren kan ge.

Som tidigare nämnts är gränsvärdet sannolikt mycket konservativt. Vidare har konservativa antaganden använts i ovan nämnda indata. Det ska också tilläggas att sannolikheten för att flammen har exakt denna vinkel är mycket liten.

Det är troligtvis möjligt att med ytterligare beräkningar visa att muren kan vara något lägre.

Enligt /3/ behöver en mur uppnå EI 60 och ha en stabil byggnadskonstruktion, se även avsnitt 2.1.5 ovan. Resultatet av denna bilaga blir att muren behöver vara minst 1 meter högre än det mobila gaslagret. Det är dock tillräckligt om murens översta del endast skyddar under de första cirka 10 minuterna då flammen är som längst. Därmed skulle den översta delen av skyddet

kunna utgöras av ett klenare material, exempelvis en stabilt fäst stålplåt. Den stabila byggnadskonstruktionen av muren bedöms dock behöva vara minst 0,5 meter högre än det högsta mobila gaslager som kan förväntas förekomma. Plåten behöver då skydda ytterligare 0,5 meter för att uppnå ett skydd på totalt 1 meter.