

Utveckling av en enkel mätmetod för bitumenrök (VOC)



LUNDS
UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

vid Campus Helsingborg
Institutionen för Teknik och samhälle

Examensarbete:

Abdulrahman Hussein

Ali Sulaimani

© Copyright Abdulrahman Hussein, Ali Sulaimani

LTH vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

Faculty of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2024

Förord

Detta examensarbete markerar slutet på vår utbildning vid Lund tekniska högskola, inom programmet Högskoleingenjörsutbildning i byggt teknik - väg- och trafikteknik. Det är med stor glädje och en känsla av uppfyllelse som vi nu presenterar vårt arbete, vilket inte hade varit möjligt utan stöd och vägledning av våra handledare.

Vi vill först och främst uttrycka vårt djupa tack till vår handledare, Joacim Lundberg (Lunds tekniska högskola) och Sara Janhäll (Chalmers tekniska högskola), vars expertis och insikter har varit ovärderliga genom hela processen. Deras stöd och tålmod har varit en stor motivation för oss. Ett speciellt tack går till vår handledare Mark Smith på Peab Asfalts laboratorium i Göteborg, vars kunskaper och resurser har varit till stor hjälp i vårt arbete. Vi vill även rikta ett särskilt tack till Jenny-Ann Östlund vid Peab Asphalt. Det var på hennes initiativ som detta examensarbete startades.

Slutligen, ett tack till alla som direkt eller indirekt bidragit till våra experiment och skrivandet av detta arbete. Vi hoppas att vår studie bidrar till inspiration för vidare forskning.

Helsingborg, maj 2024

Abdulrahman Hussein och Ali Sulaimani

Sammanfattning

Detta examensarbete syftar till att utveckla en enkel mätmetod av flyktiga organiska föreningar (VOC) som frigörs från bitumen, en kritisk komponent i tillverkning av asfalt. Med tanke på att bitumen är en råoljeprodukt, särskilt vid uppvärmningen, är det viktigt att noggrant övervaka och kontrollera dess emissioner under bearbetning för att säkerställa en hållbar resurshantering.

I detta arbete presenteras en enkel metod för att mäta totala VOC-emissioner från bitumen under uppvärmning och under avsvalningsprocessen, vilket är avgörande för att förstå dess egenskaper och potentiella risker i arbetsmiljön. Experimentet bygger på att utföra en serie experiment med tre olika bitumentyper och bitumen mängder i tre olika burkvolymer. Experimenten utfördes i ett speciellt utrustat laboratorium med syfte att identifiera kritiska faktorer som påverkar VOC-utsläppen.

Resultaten från experimentet har inte bara bidragit till en djupare förståelse av VOC-emissioner utan har även visat hur anpassade mätmetoder kan förbättra datakvaliteten. Det framkom att flera faktorer, inklusive val av termometer, storleken på insamlingstratten och mängden samt typen av bitumen, påverkar mätningarna av VOC. Mindre trattar och större mängder bitumen tenderar att reducera VOC-halten, medan valet av bitumentyp hade en direkt effekt på emissionerna under uppvärmningsprocessen. Framtida studier kan bygga vidare på dessa resultat för att vidareutveckla den nya mätmetoden och kanske skapa nya tekniker för att öka precisionen och reproducerbarheten.

Nyckelord: Bitumen, bitumenrök, VOC, mätmetod, ION Tiger XT.

Summary

This thesis aims to develop and improve a simple measurement method for volatile organic compounds (VOC) released from bitumen, a critical component in asphalt manufacturing. Given that bitumen is a petroleum product, especially during heating, it is crucial to meticulously monitor and control its emissions during processing to ensure sustainable resource management.

This work presents a straightforward method for measuring the total VOC-emissions from bitumen during heating and the cooling process, which is essential for understanding its properties and potential risks in the workplace. The experiment involves conducting a series of tests with three different types and quantities of bitumen in three various container volumes. The experiments were carried out in a specially equipped laboratory, aiming to identify critical factors that influence VOC emissions.

The results of the experiment have not only contributed to a deeper understanding of VOC-emissions but have also shown how tailored measurement methods can improve data quality. It was found that several factors, including the choice of thermometer, the size of the collection funnel, and the amount and type of bitumen, affect VOC measurements. Smaller funnels and larger quantities of bitumen tend to reduce VOC-emissions, while the choice of bitumen type had a direct effect on emissions during the heating process. Future studies can build on these results to further develop the new measurement method and perhaps create new techniques to increase precision and reproducibility.

Keywords: Bitumen, bitumen fumes, VOC, measurement method, ION Tiger XT.

Ordlista

VOC	Flyktiga organiska föreningar (Volatile Organic Compound), är ämnen som kan uppstå vid förbränning och kan också frigöras genom avdunstning från exempelvis bensinångor och lösningsmedel.
PAH	Polyaromatiska kolväten är en grupp kemiska föreningar som bildas vid förbränning av organiskt material.
Bitumen	Bindemedel som framställs genom raffinering av råolja används inom vägbyggnation i asfaltbeläggningar.
Penetrationsbitumen	Ett värde som beskriver bitumenets konsistens. Lägre värden innebär hårdare bitumen, högre värden mjukare bitumen.
B22-010-T 160/220, Västerås	Penetrationsbitumen med intervall 160/220, indikerande medelhård konsistens. Används för asfaltbeläggningar, anpassade för varma och måttliga klimat. "Västerås" pekar på tillverkningsort.
B22-082-T 50/70, Malmö	Penetrationsbitumen med intervall 50/70, indikerande en hårdare konsistens. Används i asfaltbeläggningar för högre krav på hållbarhet och stabilitet. Tillverkad i Malmö.
B23-013-D 160/220, Västerås	Penetrationsbitumen med intervall 160/220, vilket visar på en medelhård konsistens. Lämplig för asfaltbeläggningar i varma och måttliga klimat. Tillverkad i Västerås.

Halt

Mått på koncentrationen av en specifik komponent.

Emission

Utsläpp av gaser eller partiklar från en källa till omgivningen.

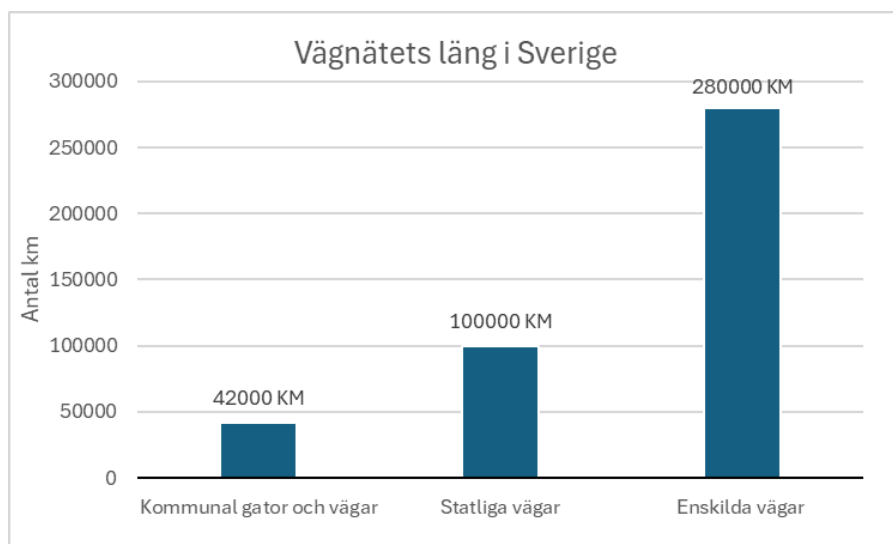
Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställningar	4
1.3 Avgränsningar	5
2 Bitumen och dess hälsorisker	6
2.1 Vad är bitumen	6
2.2 Framställning av bitumen	7
2.3 Bitumens kemiska sammansättning	9
2.4 Lättflyktiga organiska ämnen (VOC)	10
2.5 Hälsö- och miljöeffekter av VOC	11
3 Metoder	14
3.1 Metodiken bakom metoden	14
3.2 Volymen för de burkar som användes under experimentet	15
3.3 VOC-mätaren ION Tiger XT	17
3.4 Laborativa experiment	19
3.4.1 Delexperiment A	22
3.4.2 Delexperiment B	23
3.4.3 Delexperiment C	24
3.4.4 Delexperiment D	24
3.4.5 Delexperiment E	25
3.4.6 Delexperiment F	26
3.4.7 Delexperiment G och H	26
4 Resultat och diskussion	28
4.1 Uppmätt VOC	28
4.2 Jämförelse av de olika testmetoderna	30
4.3 Faktorer som påverkar resultatet	47
4.4 Felkällor	51
4.5 Utveckling av mätmetoden	54
5 Slutsatser och rekommendationer	57
5.1 Slutsatser	57
5.2 Rekommendationer för fortsatt metodutveckling	57
Referenser	59

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I Sverige, liksom i många andra länder, utgör asfalterade vägar ryggraden i det nationella vägnätet. Enligt Asfaltboken (2020) representerar vägnätet i Sverige 1 % av landets yta. Det svenska vägnätet består av statliga (europavägar, länsvägar och riksvägar), kommunala och enskilda vägar (Asfaltskolan (2020); Sveriges kommuner och landsting (2018)), se Figur 1. Dessa vägar har funktionen att de möjliggör transport av personer och varor mellan olika delar av landet vilket är avgörande för såväl den ekonomiska utvecklingen som för samhällsfunktionerna i stort.



Figur 1. Översikt över vägnätet i Sverige. Datakälla: (Asfaltskolan (2020); Sveriges kommuner och landsting 2018)

De belagda vägarna i Sverige har främst lager av asfaltbetong i övre delen av vägkonstruktionen. Enligt Asfaltskolan (2020) har det i Sverige under de senaste

åren producerats och använts ungefär fem till sju miljoner ton asfalt per år, vilket innebär att det är knappt ett ton asfalt per person.

Agardh & Parhamifar (2014) poängterar att asfalten består av tre materielgrupper: bitumen, filler och ballast (stenmaterial). Bitumen anses som den mest kritiska komponenten i asfalt och bidrar till materialets särskilda viskoelastiska egenskaper. Valet av bitumentyp bör anpassas efter lokala klimatförhållanden och trafikbelastning. Klimatförhållandena spelar roll med bitumentypen då kallare klimat behöver en mjuk bitumentyp och varmare klimat behöver hårdare bitumentyp. Vidare beskrivs att i asfaltskonstruktioner tjänar bitumen som ett bindemedel vilket skyddar stenmaterialet från att krossas samt förbättrar konstruktionens förmåga att fördela belastningen. Bitumen har både elastiska och viskösa kvaliteter där dess elastiska natur möjliggör för konstruktionen att återhämta sig efter att ha blivit deformerad. Bitumens viskositet tillåter beläggningen att anpassa sig till rörelser utan att spricka och att bitumen gör beläggningen flexibel.

Granhage (2009) och Shukir och Bakalov (2007) belyser att vid asfaltproduktion krävs att bitumen värms till en flytande form för att kunna blandas med torkat uppvärmt stenmaterial och eventuella tillsatsmedel. Denna process sker vid asfaltverk där materialen blandas och hettas upp till temperaturer mellan 150°C till 180°C (Asfaltgruppen, u.å). NVF (2000) poängterar att under upphettning av bitumen för både blandning till asfalt i asfaltverk och vid utläggning i fält frigörs ångor och rök från bitumen. Bitumenrök innehåller flyktiga organiska föreningar (VOC) och polycykliska aromatiska kolväten (PAH) som är en blandning av kemikalier (Asfaltens gröna bok, 2000). Enligt American Lung Association (2024);

kemikalieinspektionen (2015); Naturvårdsverket (2007) vissa VOC:er är cancerframkallande och de medför andra skadliga hälsoeffekter.

Arbetsmiljöverket (2022) har utfärdat riktlinjer och gränsvärden för korttidsexponering (lägre än 15 minuter) av bitumenrökens ämne på arbetsplatser för att minimera hälsoriskerna. Exempel på sådana ämnen med respektive gränsvärde återfinns i Tabell 1.

Tabell 1. Korttidsexponeringsgränser för vissa ämnen i bitumenrök. Källa: (Arbetsmiljöverket, 2022)

Ämne	Korttidsgränsvärde [mg / m^3]
Nonaner	1100
N-hexan	180
Acetaldehyd	90
Naftalan	80
Formaldehyd	0,74

Med tanke på bitumens komplexa sammansättning och dess omfattande användning i det svenska vägnätet understryker problemen med olika kvaliteter och okända beståndsdelar i bitumen- och asfaltindustrin behovet av en enklare och snabbare mätmetod. Idag är tillgängliga analysmetoder både kostsamma och tidskrävande, vilket inte möter industrins behov av en snabb, enkel och effektiv mätmetod. Framtagandet av en sådan metod skulle inte bara effektivisera arbetsflödet utan också förbättra arbetsmiljön genom att minska exponeringen för dessa potentiellt farliga ämnen. Genom att införa en snabb, enkel och effektiv

mätmetod kan ett steg tas mot en säkrare och mer hållbar hantering av bitumen inom vägbyggnadsindustrin.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att utforska och identifiera de kritiska faktorer som påverkar genereringen av VOC-halter i bitumenrök efter uppvärmningsprocessen. Det primära syftet är att försöka utveckla en enkel, snabb och effektiv metod för mätning av flyktiga organiska föreningar (VOC) från bitumen med fokus på att optimera de förhållanden under vilka dessa mätningar genomförs. Utifrån experimentets resultat kan forskningsfokus komma att justeras för att optimera mätmetoden beroende på de initiala resultaten och arbetets fortsatta utveckling. Denna forskning är avsedd att bidra till en mer detaljerad förståelse av VOC-emissionernas beteende vid olika temperaturer och bitumenförhållanden. Genom att förbättra förståelsen och mätningen av VOC-halterna kan arbetet bidra till en säkrare arbetsmiljö för de inblandade och därmed minska hälsoriskerna.

För att nå syftet kommer arbetet besvara följande frågeställningar:

- Vilka är de kritiska faktorer som påverkar genereringen av VOC-emissioner?
- Kan en enkel mätmetod utvecklas som optimeras med hänsyn till de kritiska faktorerna?
- Hur varierar VOC-utsläppen mellan olika typer av bitumen vid identiska experimentella förhållanden?

1.3 Avgränsningar

Arbete kommer att avgränsas till att fokusera på bitumen och inte asfaltmassor eller beläggningar av asfaltbetong. Fältprover från vägkonstruktioner eller asfaltblandningar kommer inte att undersökas. Dessutom behandlas inte de långsiktiga hälsoeffekterna eller miljöpåverkan av VOC-emissioner från bitumen utan studien inriktar sig endast på de omedelbara emissionerna direkt efter uppvärmningen och under avsvalningsprocessen i en kontrollerad miljö. Genom att begränsa sig till VOC-emissioner kan en mer detaljerad och noggrann förståelse för dess faror vid hantering i asfaltlaboratorium och tillverkning av asfaltmassor erhållas. Studien ämnar att ta fram en metod som särskiljer bitumen då det kommer till VOC övergång, därför korrelerar inte mätresultaten för faktisk exponering i labb eller vid asfalttillverkning.

Detta experiment fokuserar på att utveckla och optimera en mätmetod för att bestämma VOC-emissioner från bitumenrök i en asfaltlaboratoriemiljö. Arbetet kommer att avgränsa sig till specifika förutsättningar såsom användandet av en uppvärmningstemperatur på 160 °C, endast tre bitumentyper och endast tre olika burkvolymer. Detta experiment begränsar sig till specifika parametrar såsom avsvälningstemperatur, bitumenmassan i burken och förhållandet mellan bitumen och luftvolymen i burken. Dessa avgränsningar syftar till att säkerställa att experimentet är hanterbart och ger konkreta resultat inom det specificerade området.

2 Bitumen och dess hälsorisker

2.1 Vad är bitumen

Agardh & Parhamifar (2014) beskriver att bitumen är ett bindemedel som framställs genom raffinering av råolja och kan skapas i naturen i form av naturasfalt. Bitumen är ett mörkbrunt till svart material och dess konsistens kan variera från mjuk till hård beroende på temperaturen. Dess bindande förmåga gör att den används inom vägbyggnation i asfaltbeläggningar där bitumen används som bindemedel på grund av dess egenskaper såsom vidhäftningsförmåga, vattentäthet, kemikalieresistent, resistens mot klimattillstånd (dvs. mot värme, kyla, regn och luft) och lastfördelnings förmåga.

Enligt Agardh & Parhamifar (2014) kan olika typer av bitumen användas beroende på behovet av olika klimutförhållanden. I kallare klimat behöver bitumen vara mer elastisk för att förhindra sprickbildning i vägbeläggningen, medan i varmare klimat behöver bitumen vara hårdare för att motstå deformationer.

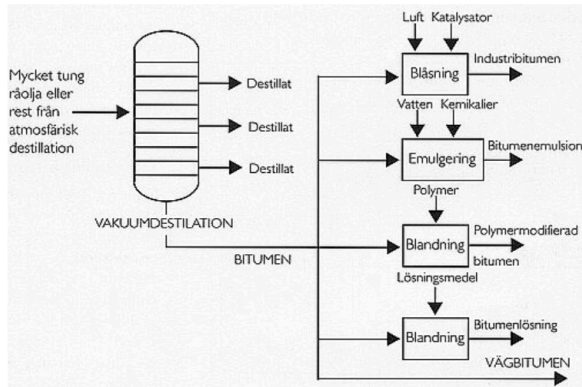
Asfaltboken (u.å) beskriver att bitumen är ett viskoelastiskt material, vilket innebär att den har både elastiska och plastiska deformationsegenskaper under belastning. Vidare förklaras att det elastiska beteendet hos bitumen liknar hur en gummiboll studsar, medan det plastiska beteendet hos bitumen är jämförbart med oljan (t.ex. hur den flyter). Vid de temperaturer som normalt förekommer på vägar upplever bitumen en blandning av dessa två typer av deformationer vilket är beroende av bindemedelstyp, omgivningstemperaturen och varaktigheten av belastningen.

Asfaltboken (u.å) nämner att bitumens viskoelastiska egenskaper modellerats genom användning av en kombination mellan seriekopplade och parallellkopplade stötdämpare och fjädrar, där dessa komponenters respons ändras beroende på temperaturen. Denna modell hjälper till att förstå hur bitumen beter sig under olika trafikförhållanden och temperaturer.

2.2 Framställning av bitumen

Agardh och Parhamifar (2014) beskriver att bitumenlösning framställs genom att blanda uppvärmt bitumen med lösningsmedel vilket minskar dess viskositet så att den kan appliceras på vägar. Detta underlättar integrationen med stenmaterial som bildar vägbanans ytskikt. Blandningsförhållandet mellan bitumen och lösningsmedel avgör lösningens viskositet. Viskositeten i bitumenlösningen varierar beroende på mängden lösningsmedel i blandningen, vilken bör ligga mellan 25 och 50 procent. När lösningsmedlet avdunstar, återgår bitumen till sitt ursprungliga tillstånd och egenskaper.

Asfaltboken (u.å) beskriver att framställningen av bitumen involverar flera steg där råolja raffinerar för att producera olika typer av bitumenprodukter (se Figur 2). Ytterligare beskrivs att först genomgår råoljan en destillation för att separera olika fraktioner baserat på deras kokpunkter. Genom detta skapas destillerat bitumen som utgör grunden för vidare bearbetning såsom oxiderat bitumen, extraherat bitumen, bitumenlösning, bitumenemulsion eller polymermodifierat bitumen (PMB).



Figur 2. Framställning av bitumen. Källa: Asfaltboken (u.å)

Enligt Asfaltboken (u.å) framställs destillerat bitumen genom att råoljan värms upp med höga temperaturer som går upp till 300–350°C, vilket skapar en blandning av gas och vätska. Sedan leds blandningen in i en destillationskolonn. Detta gör att lättare fraktioner och gaser samlas i kolonnens topp, medan tyngre fraktioner samlas längre ner. De tyngre fraktionerna (som består av tunga oljor och bitumen) tas ut som rester i kolonnens botten. Vidare görs en vakuumdestillation som resulterar till framställning av destillerat bitumen som används i asfaltstillverkning. Vakuumdestillation tillämpar undertryck som möjliggör kokning vid lägre temperaturer, för att undvika att högkokande oljor och bitumen förstörs vid atmosfärstryck.

Asfaltboken (u.å) beskriver behovet av ett bitumen som har hög värmetålighet men ändå god flexibilitet vid låga temperaturer för vissa ändamål. Vidare beskrivs att sådana egenskaper kan uppnås genom att oxidera bitumenet. Det sker genom att blåsa finfördelad luft genom bitumenet vid temperaturen 240–320°C i ett oxidationstorn. Oxidationen resulterar i kemiska reaktioner som ökar bitumens mjukpunkt och gör det hårdare.

Enligt Asfaltboken (u.å) framställs extraherat bitumen, även känt som propanbitumen, genom att lösningsmedelsextraktion. Vidare berättas att bitumenet blandas med ett lösningsmedel (t.ex. propan) som resulterar i att ett hårt bitumen separeras från en tjock olja. Bitumenlösningar och mjukt bitumen produceras genom att blanda destillerat bitumen med lösningsmedel eller oljor för att uppnå en önskad mjukhet vid rumstemperatur. Asfaltboken (u.å) beskriver även att bitumenemulsioner tillverkas genom att finfördela bitumen i vatten, vilket ger en flytande form som är hanterbar vid lägre temperaturer. Polymermodifierat bitumen (PMB) tillverkas genom att blanda in olika typer av polymerer för att förbättra bitumens egenskaper, exempelvis dess elasticitet och hållbarhet (Asfaltboken, u.å).

2.3 Bitumens kemiska sammansättning

Enligt Asfaltboken (u.å) är bitumen en blandning av många kemiska föreningar som är delade till olika grupper baserat på molekylers polaritet. Följande är de olika grupper i bitumen som kan ge en djupare insikt i dess komplexa kemiska sammansättning (Mortazavi & Moulthrop, 1993):

- **Asfaltener** - Andelen asfaltener lösta i olika lösningsmedel som varierar betydligt beroende på bitumentypen och råoljekälla samt dess viskositets- och penetrationsgrad:
 - I n-heptan varierar innehållet från 25,6 % till 4,0 %.
 - I iso-oktan varierar det från 5,4 % till 0 %.
- **Polära aromater** - Utgör mellan 52,7 % och 18,7 % av bitumen i proverna, återigen beroende på bitumentypen och råoljekälla samt dess viskositets- och penetrationsgrad.

- **Naftenaromater** - Andelen varierar mellan 44,8 % och 22,4 % av bitumen, beroende på bitumentypen och råoljekälla samt dess viskositets- och penetrationsgrad.
- **Mättade föreningar** - Koncentrationen av dessa föreningar i bitumen varierar mellan 16,6 % och 1,9 %, beroende på bitumentypen och råoljekälla samt dess viskositets- och penetrationsgrad.
- **Elementaranalys** - Analyser av bitumenprover visar att kolhalten varierar mellan 89,8 % och 81,6 %, väte mellan 10,9 % och 9,72 %, samt mindre mängder av syre, kväve och svavel.

Dock är relativt lite känt om detaljerad karaktärisering av VOC i asfaltångor, eftersom deras innehåll varierar och beror på råolja och asfaltsammansättning

2.4 Lättflyktiga organiska ämnen (VOC)

VOC omfattar en rad ämnen såsom enkla kolväten, klorkolväten, aldehyder, ketoner, alkoholer och organiska syror (Luftvård 1997, refererad i Björkman 2009; ITM 2001). Vidare beskriver att dessa ämnen kännetecknas av deras förmåga att lätt avdunsta och därmed sprida sig i miljön. Följande VOC:er som innehåller PAH återfinns i bitumen: Naphthalene, Pyrene, Acenaphthylene, Benzo[a]anthracene, Acenaphthene, Chrysene, Fluorene, Benzo[b]fluoranthene, Phenanthrene, Benzo[k]fluoranthene, Anthracene, Benzo[a]pyrene, Fluoranthene, Indeno[1,2,3-cd]pyrene, Dibenzo[a,h]anthracene, Benzo[ghi]perylene (Robertus, Thimm & Hossain 2016). Endast ett fåtal av dessa PAH:er har hygieniska gränsvärden (Arbetsmiljöverket, 2022).

Enligt Liu et al. (2023) innehåller bitumenrök ett flertal typer av VOC:er, däribland alkaner, olefiner, kolvätederivat, aromatiska kolväten och aromatiska

kolvätederivat. Enligt Arbetsmiljöverket (2022) beskrivs att exponering för bitumenrök kontrolleras via arbetsmiljömätningar för att säkerställa att mängden av farliga VOCer inte överstiger hygieniska gränsvärden.

2.5 Hälsa- och miljöeffekter av VOC

Luftvård (1997, refererad i Björkman 2009; Yang et al. 2022; Autelitano, F. Bianchi, F & Giuliani, F 2017) konstaterar att flyktiga organiska föreningar (VOC) innehåller skadliga föroreningar som kan överföras till människor genom mat, vatten eller inandning och de är inte bara farliga för människors hälsa utan miljön också. VOC kännetecknas att vara hälsofarliga med potential att vara cancerframkallande samt påverka blodbildning och DNA-segment. Enligt Yang et al. (2022) orsakar flyktiga organiska föreningar (VOC) allvarliga hälsoeffekter genom att påverka levern, njurarna och nervsystemet, och kan även leda till blodsjukdomar. Chen et al. (2022) rapporterar att bitumenrök klassificerades som cancerframkallande av Internationella byrån redan 1987. Li et al. (2022) påpekar att byggnadsarbetare som är involverade i hantering av asfaltblandning och vägbeläggning löper en hög risk att utveckla lungcancer.

Björkman (2009) beskriver att exponering för VOC-föroreningar kan också öka risken för andningssjukdomar såsom astma och hjärt-kärlrelaterade sjukdomar. Dessutom bidrar VOC till snabbare bildning av marknära ozon, vilket kan orsaka kroniska lungsjukdomar som astma. Olika VOC-grupper har olika skadlighet på människors hälsa, se Tabell 2.

Tabell 2. Skadlighet för de olika VOC-grupperna. Källa: (Luftvård, sjätte upplagan 1997, refererad i Björkman 2009).

Olika grupper av VOC	Skadlighet
Alkaner	Kan vara cancerogent
Alkener	Ökar risken för tumörer hos människor och djur
Aromater	Kan ge irritationer på slemhinnor, huvudvärk och klassas som cancerogent
Aldehyder	Irriterande på slemhinnor och allergena
Alkoholer	Inga dokumenterade genotoxiska effekter
Kolerade kolväten	Skadar det centrala nervsystemet och de betraktas som cancerogena
Polyaromatiska kolväten	Både mutagena och cancerogena

VOC är indelad i fyra huvudgrupper beroende på deras påverkan på miljö och hälsa (Luftvård 1997, refererad i Björkman 2009):

- **VOC-OX**-gruppen bidrar till skapandet av marknära ozon och andra oxidanter. Detta sker genom kemiska reaktioner i atmosfären där hydroxylradikaler och syre är centrala, vilket främjar omvandlingen av NO till NO₂, vilket är en kritisk process för ozonproduktion.

- **VOC-TOX**-gruppen inkluderar skadliga ämnen för både människor och djur, såsom klorerade lösningsmedel. Dessa föreningar är vanligt förekommande, särskilt i stadsområden där deras nivåer kan öka beroende på trafikbelastningen. Gruppen omfattar även de persistenta organiska föreningar, där dessa är svårnedbrytbara och leder till långsiktiga miljöföroreningar.
- **VOC-STRAT**-gruppen omfattar ämnen såsom freoner, som är inblandade i nedbrytningen av det övre ozonlagret.
- Slutligen finns **VOC-CLIM**-gruppen, som består av ämnen som kan absorbera värmestrålning och påverka molnens optiska egenskaper, vilket är relevant för klimatförändringarna.

3 Metoder

3.1 Metodiken bakom metoden

Baserat på litteraturstudier och diskussioner med experter inom området, har en metod både testas och vidareutvecklas i laboriemiljö hos Peab Asfalt i Göteborg under våren 2024. Den befintliga metoden inleds med att bitumenprover värms till en specifik temperatur. När denna temperatur nås, öppnas behållarens lock för att mäta VOC-halten, följt av en temperaturmätning med en stavtermometer.

För att ytterligare förbättra metoden har ett avsvalningsmätning implementerats för att studera hur olika variabler påverkar VOC-utsläppen. Experimentet utvidgades till att inkludera tre olika bitumentyper för att jämföra deras reaktioner vid en given temperatur och deras respektive VOC-utsläpp. En förberedelse där bitumenproverna värms upp i en ugn dagen före testning planerades. För att samla och leda VOC-emissioner under avsvalningsprocessen, planerades användningen av en huv inspirerad av Janhäll et al. (2024). Det visade sig dock att denna huven inte var lämplig på grund av storleksskillnaden mellan huven och burkarna, varefter användning av trattar passade burkarna bättre.

Under experimentets gång utforskades även effekten av större bitumenmassa för att identifiera ytterligare påverkande faktorer. Användningen av en stavtermometer, där termometerens stav sätts in och rörs om i bitumenproven för att mäta innertemperaturen, ansågs vara tidskrävande och resulterade i förluster av både VOC och temperatur. Istället infördes användningen av en lasertermometer, vilket möjliggjorde en snabbare temperaturmätning utan fysisk kontakt med bitumen.

3.2 Volymen för de burkar som användes under experimentet

Volymen för de olika bitumenburkar (se Figur 3) som användes under försöken bestämdes genom dess geometri enligt följande:

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot h$$

V är volymen i cm³, r är radien i cm och h är höjden i cm.

Volymen för bitumen som användes för mätningarna kan utifrån den kända bitumendensiteten bestämmas genom:

$$V_{bitumen} = m_{bitumen} \cdot \rho_{bitumen}$$

Där $V_{bitumen}$ är volymen bitumen i cm³, $m_{bitumen}$ är massan bitumen i gram och $\rho_{bitumen}$ är bitumenets densitet i g/cm³.

Andelen bitumen i bitumenburken bestäms för att undersöka hur andelen påverkar emissionerna av VOC. Andelen bitumen i burken bestämdes enligt:

$$\frac{V_{bitumen}}{V_{burk}} = \text{Andel bitumen}$$

Där $V_{bitumen}$ är volymen bitumen i cm³, V_{burk} är bitumenburkens volym i cm³ och Andel bitumen är andelen av burkens volym som är bitumen i %. Samtliga beräkningar av volymer har sammanfattats i Tabell 3.



Figur 3. Samtliga burkstorlekar som användes under experimentet. Burkarnas volym börjar från vänster: 5010 cm^3 , 1600 cm^3 och 560 cm^3 . Foto: Mark Smith.

Tabell 3. Sammanfattning av de olika parametrar som behövs för att bestämma andelen av bitumenvolymen i förhållande till bitumenburkens volym. Andelarna har avrundats till närmaste decimal.

Bitumen				Bitumenburk		Andel bitumenvolym relativt burkens volym [%]
Typ	Densitet [g/cm ³]	Massa [g]	Volym [cm ³]	Radie [cm]/ höjd [cm]	Volym [cm ³]	
010	1,025	150	153,75	5,15/6,7	560	27
				5,15/19	1600	10
		300	307,5	5,15/6,7	560	55
				5,15/19	1600	19
		1800	1845	8,4/23	5010	37
		2000	2050	8,4/23	5010	41
082	1,025	150	153,75	5,15/6,7	560	27
				5,15/19	1600	10
		300	307,5	5,15/6,7	560	55
				5,15/19	1600	19
		1800	1845	8,4/23	5010	37
		2000	2050	8,4/23	5010	41
013	1,011	150	151,65	5,15/6,7	560	27
				5,15/19	1600	10
		300	303,5	5,15/6,7	560	54
				5,15/19	1600	19
		1800	1820	8,4/23	5010	36
		2000	2022	8,4/23	5010	40

3.3 VOC-mätaren ION Tiger XT

Enlig ION Science (u.å) VOC-mätaren ION Tiger XT (se Figur 4) är en avancerad bärbar VOC-detektor som använder sig av fotojoniseringsteknologi (PID) för en

snabb och noggrann detektering av flyktiga organiska föreningar (VOC). Tiger XT är utrustad med patenterad Fence Electrode Technology, vilket optimerar dess prestanda i fuktiga och förorenade atmosfärer och därmed gör den idealisk för noggranna mätningar under varierande förhållanden.

Enlig ION Science (u.å) Tiger XT har en mätnoggrannhet på $\pm 5\%$ och har förmågan att detektera koncentrationer från så låga som 1 del per miljard (ppb) upp till 20 000 delar per miljon (ppm). Tiger XT har en snabb svarstid på under två sekunder och lika snabb nedrensningstid. Instrumentet kan detektera över 750 olika flyktiga organiska föreningar (VOC:er) och giftiga ämnen. Tiger XT är anpassad för användning i tuffa miljöer då den har en stark och tålig design och har en IP65-klassificering vilket betyder att den är anpassad för att tåla både damm och vatten.



Figur 4. VOC-mätare av typ Tiger XT från tillverkaren ION Science. Foto: Hussein och Sulaimani.

3.4 Laborativa experiment

Tre bitumentyper förbereds och neddelades i till olika burkar med tre olika volymer och olika bitumenmassor. Utifrån de förberedda proverna genomfördes åtta olika delexperiment: A, B, C, D, E, F, G och H. Nedan beskrivs skillnader mellan de olika delexperimenten. De olika delexperimenten utvecklades under tiden utifrån resultaten från föregående delexperiment. Utrustning som användes för de olika delexperimenten är följande:

- Trattar (se Figur 5)
- En stavtermometer (se Figur 6)
- En lasertermometer (se Figur 7)
- En VOC-mätare ION Tiger XT (se Figur 4)
- Ett plaströr (se Figur 8)
- En metalhuva (se Figur 8)
- En ugn (se Figur 9)
- Tre olika bitumentyper
- Tre olika burkstorlekar (se Figur 3)



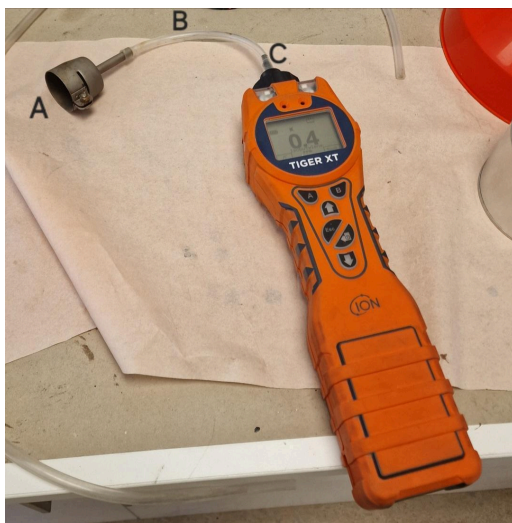
Figur 5. Trattar som användes under experimentet. Foto: Hussein och Sulaimani.



Figur 6. Stavtermometer som användes under delexperimenten A och B. Foto: Hussein och Sulaimani.



Figur 7. Lasertermometer som användes under delexperimenten C till H. Foto: Hussein och Sulaimani.



Figur 8. Metallhuva (A), Plaströret (B) och VOC mätarens öppning (C).



Figur 9. Ugnen som användes under experimentet med temperaturen satt till 160 °C. Foto: Hussein och Sulaimani.



Figur 10. Metallbiten som användes som ett lock. Foto: Hussein och Sulaimani.

Följande metodbeskrivningen är indelad efter de åtta olika delexperimenten. Inför varje delexperiment presenteras en lista med utrustning och experimentella förutsättningar som särskiljer det delexperimentet från de övriga. En sammanfattning över utrustningen och experimentella förutsättningar som användes i varje delexperimentet kommer att redovisas i Tabell 4 efter att samtliga delexperimenten har beskrivits.

3.4.1 Delexperiment A

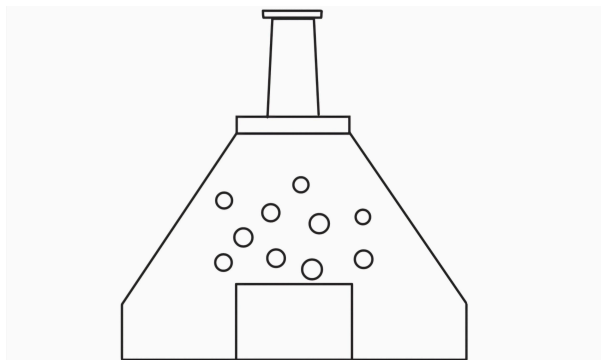
För delexperiment A användes följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- En stor tratt (Se Figur 5)
- En stavtermometer (Se Figur 6)
- Burkens volym är 560 cm³
- 150 gram bitumen i varje burk
- Uppvärmningstiden är 18 timmar
- Avsvalningen mäts med hjälp av ett plaströr som är ansluten till metallhuva och VOC-mätaren (se Figur)

En burk med volym 560 cm³ fylldes med 150 gram bitumen i en ugn med 160 °C i 18 timmar innan experimentet. VOC-mätningarna genomfördes genom att bitumenproverna togs ut ur ugnen och VOC-halterna mättes direkt från burkarna. För att fånga upp VOC under avsvalningen täcktes burkarna helt med en uppochnedvänd stor tratt (se Figur 11) och en metallbit placerades ovanpå trattens öppning som ett lock (Se Figur 10). VOC:n under avsvalningen mättes genom att ett plaströr kopplas från ena sidan av VOC-instrumentet och andra sidan till trattens öppning med hjälp av en metallhuva som satt på trattens öppning (se Figur 8). Avsvalningen registrerades först efter en minut och därefter var femte minut tills VOC-värden under 10 ppm uppnåddes. Enligt Smith¹ anses värdena under 10 ppm vara ointressanta då VOC-halten under 10 ppm är inte riktigt relevant eftersom det finns okontrollerbara parametrar under experimentet. Vidare beskriver Smith att värden avrundade uppåt till närmaste 10 ppm räcker för att få en uppfattning om metoden visar några meningsfulla resultat. Temperaturen mättes med en stavtermometer efter varje VOC-mätning. Stavtermometen sätts in i

¹ Mark Smith, Forsknings- och utvecklingsspecialist. Peab Asfalt AB, Göteborg. E-post den 22 maj 2024.

bitumenproverna och rörs om i cirka 30 sekunder för att mäta den inre temperaturen i bitumenprovet.



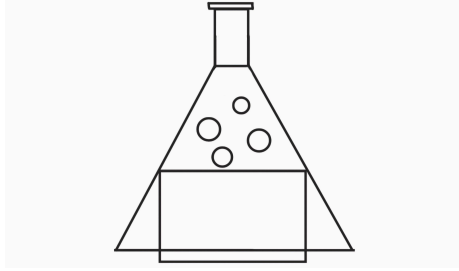
Figur 11. En illustration över hur bitumenburkar täcktes med en uppochnedvänd stor tratt med en metallbit som ett lock för att fånga upp VOC under avsvälningen.

3.4.2 Delexperiment B

Delexperiment B skiljer sig från delexperiment A genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- En liten tratt (se Figur 5)
- Uppvärmningstiden är 60 minuter

Det observerades i delexperiment A att den stora trattens volym och utformning ledde till en längre samlingsperiod för VOC vid trattens öppning och därmed resulterande i lägre VOC-halter jämfört med mätningar gjorda direkt efter uppvärmningen. Därför ersattes den stora tratten med en mindre tratt för att undersöka dess inverkan på mätningarna. Den mindre tratten passade burkens diameter mer (se Figur 12) och trattens öppning täcktes med en metallbit mellan mätningarna för att hindra VOC att avgå. Avsvälningen mättes efter en minut, fem minuter och tio minuter för att överlappa med delexperiment A.



Figur 12. En illustration över hur bitumenburkar täcktes med en uppochnedvänd liten tratt med en metallbil med ett lock för att fånga upp VOC under avsvälningen.

3.4.3 Delexperiment C

Delexperiment C skiljer sig från delexperiment B genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- En lasertermometer (se Figur 7)

Det noterades i delexperiment B att användningen av stavtermometer är tidskrävande och bidrar till både temperatur- och VOC-förlust under mätprocessen. Av denna orsak ersätts stavtermometer med en lasertermometer. Lasertermometern mäter temperaturen snabbare och därigenom tillåter snabbare mätningar innan mer VOC avgår, då den valdes för de återstående mätningarna. Mätningen och varaktigheten för avsvälningmätningen utfördes som i delexperiment B, förutom att temperaturen mäts med hjälp av lasertermometer.

3.4.4 Delexperiment D

Delexperiment D skiljer sig från delexperiment C genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- 300 gram bitumen i varje burk

Efter att det konstaterades att den mindre tratten ledde till högre VOC-halter (då en mindre tratt har mindre luftvolym) beslutades det att minska luftvolymen i

burkarna ytterligare. Detta gav upphov till idén att fördubbla bitumenmassa i burkarna för varje bitumentyp för att undersöka förhållandet mellan bitumen- och luftvolymen i burken. Experimentet utfördes på samma sätt som i delexperiment C med den enda skillnaden att bitumenmassan fördubblades till 300 gram.

3.4.5 Delexperiment E

Delexperiment E skiljer sig från delexperiment D genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- Ingen tratt
- Burkens volym är 1600 cm³
- 150 gram bitumen i varje burk
- Avsvalningsmätningen utfördes utan extra tillägg på VOC-mätaren

Skillnaden mellan experiment C och D gav intressanta oväntade resultat, vilket ledde till att upprepa försöket med en större burk. Undersökningen fokuserade på att undersöka bitumens förhållande med luft. VOC mättes direkt från burken utan att någon tratt användes eftersom det inte var önskvärt att mer luftvolym än den redan befintliga i burken skulle tillföras. Burkarna med volymen 1600 cm³ placerades i ugnen vid 160 °C i 10 minuter innan bitumenet hälldes i så att de var tillräckligt varma innan 150 gram bitumen av varje typ (som också hade en temperatur på 160 °C) hälldes i. Eftersom bitumenet inte var i burken och inte värmdes i ugnen som i de andra delarna av experimentet, mäts VOC efter 5 minuter från och med att locket placerats på burken så att tillräckligt VOC skulle hinna genereras. VOC mätningen utfördes två gånger, efter 5 minuter och 10 minuter, för att underlätta jämförelsen med andra delexperimenten.

3.4.6 Delexperiment F

Delexperiment E skiljer sig från delexperiment F genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- 300 gram bitumen i varje burk

Här undersöktes luft förhållandet när mängden bitumen fördubblades i burkar av samma storlek med volymen 1600 cm^3 . Detta delexperiment var en följd av delexperiment E för att kunna jämföra dem med varandra som det gjordes med delexperiment C och D. Experimentet utfördes på samma sätt som i delexperiment E med den enda skillnaden att bitumenmassan fördubblades till 300 gram.

3.4.7 Delexperiment G och H

Delexperiment G och H utfördes parallellt med delexperiment E och F. VOC mättes de stora burkarna med volymen 5010 cm^3 direkt från ugnen innan bitumenet överfördes till 1600 cm^3 brukar. Först började VOC-mätning med delexperiment H (2000 gram bitumen) och sedan ställdes 5010 cm^3 brukarna tillbaka i ugnen under cirka 60 minuter innan mätningen för delexperiment G. Ordningen vändes om på delexperiment G och H för att passa ihop med andra delexperiment så att den mindre bitumenmassa kommer först i ordningen.

Delexperiment G

Delexperiment G skiljer sig från delexperiment F genom följande utrustning och experimentella förutsättningar:

- Burkens volym är 5010 cm^3
- 1800 gram bitumen i varje burk

Delexperiment H

- 2000 gram bitumen i varje burk
- Uppvärmningstiden är 18 timmar

Experimenten utfördes för att undersöka om större bitumen mängden skulle göra avvikelser i mätresultaten och att jämföra skillnaden i bitumenmassa mellan dem. VOC mättes från burken direkt efter uttaget ur ugnen, utan att avsvälningen beaktas. Detta gjordes eftersom bitumenet behövde värmas upp igen för användning i andra delexperiment.

Tabell 4. En sammanfattning över utrustningen och experimentella förutsättningar som användes i varje delexperimentet

Delexperiment	Burkstorlek [cm ³]	Bitumenmassa [gram]	Trattstorlek	Termometer	Uppvärmningstid [Timmar]	VOC-mätning (Direkt)	VOC-mätning (Avsvälning)
A	560	150	Stor	Stav	18	Ja	Ja
B	560	150	Liten	Stav	1	Ja	Ja
C	560	150	Liten	Laser	1	Ja	Ja
D	560	300	Liten	Laser	1	Ja	Ja
E	1600	150	Ingen	Laser	1	Nej	Ja
F	1600	300	Ingen	Laser	1	Nej	Ja
G	5010	1800	Ingen	Laser	1	Ja	Nej
H	5010	2000	Ingen	Laser	18	Ja	Nej

4 Resultat och diskussion

4.1 Uppmätt VOC

I försöken provoceras avrykning av VOC från bitumen för att ta fram en metod som kan särskilja material då det kommer till VOC-utveckling. Totalhalt av VOC är uppmätt, men instrumentet gör ingen skillnad på ämnen i emissionerna. Tabell 5 presenterar mätresultaten för samtliga delexperiment efter direktmätning och under avsvalningsmätningar av VOC. Ytterligare information återfinns också i Tabell 5 såsom burkvolymen, densitet, bitumentyp och bitumenmassa.

Tabell 5. Uppmätta VOC-halter för mellan bitumentyperna för respektive delexperiment.

Delexperiment	Bitumentyp	Densitet [g/cm ³]	VOC-mätning [ppm] / Temperatur [°C]			
			Direkt	1 min	5 min	10 min
Massa [g]						
Burkvolym [cm ³]						
Delexperiment A	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	550 / 160	11,7 / 119,7	12,1 / 89,8	10,9 / 70,7
150 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	515 / 160	x	8,7 / 113,3	*
560 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	566 / 160	x	10,9 / 100,4	10,3 / 84,1
Delexperiment B	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	1288 / 160	67 / 125	57 / 102	24 / 81
150 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	764 / 160	27 / 128	21 / 83	5 / 60
560 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	877 / 160	42,6 / 125	44,8 / 100	53 / 80
Delexperiment C	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	1450 / 160	230 / 133	49 / 114	31 / 89,5
150 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	795,6 / 160	20 / 134	19 / 121	18,6 / 102
560 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	2200 / 160	303 / 129	120 / 110,3	12 / 86
Delexperiment D	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	700 / 160	98 / 145	36 / 107	14,8 / 97

300 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	333 / 160	21 / 116	15 / 100	30 / 98
560 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	900 / 160	35 / 114	43 / 104	14 / 89
Delexperiment E	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	-	-	360 / 110	212 / 91,8
150 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	-	-	80 / 126	60 / 105
1600 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	-	-	263,6 / 114,6	98,3 / 99
Delexperiment F	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	-	-	115 / 131	43 / 96
300 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	-	-	73,6 / 128	31,4 / 115
1600 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	-	-	137 / 117	67 / 101
Delexperiment G	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	572 / 160	-	-	-
1800 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	670 / 160	-	-	-
5010 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	1400 / 160	-	-	-
Delexperiment H	B22-010-T 160/220, Västerås	1,025	256 / 160	-	-	-
2000 g	B22-082-T 50/70, Malmö	1,025	312 / 160	-	-	-
5010 cm ³	B23-013-D 160/220, Västerås	1,011	753 / 160	-	-	-

Delexperiment A-Bs temperaturer mättes med stavtermometer, övriga med lasertermometer

Direktmätningen för samtliga delexperiment skedde direkt från burken (utan tratt)

Delexperiment As VOC-mätningar skedde med en stor tratt (förutom direkt)

Delexperiment B-Ds VOC-mätningar skedde med en liten tratt (förutom direkt)

Övriga delexperiment använde ingen tratt vid VOC-mätningar

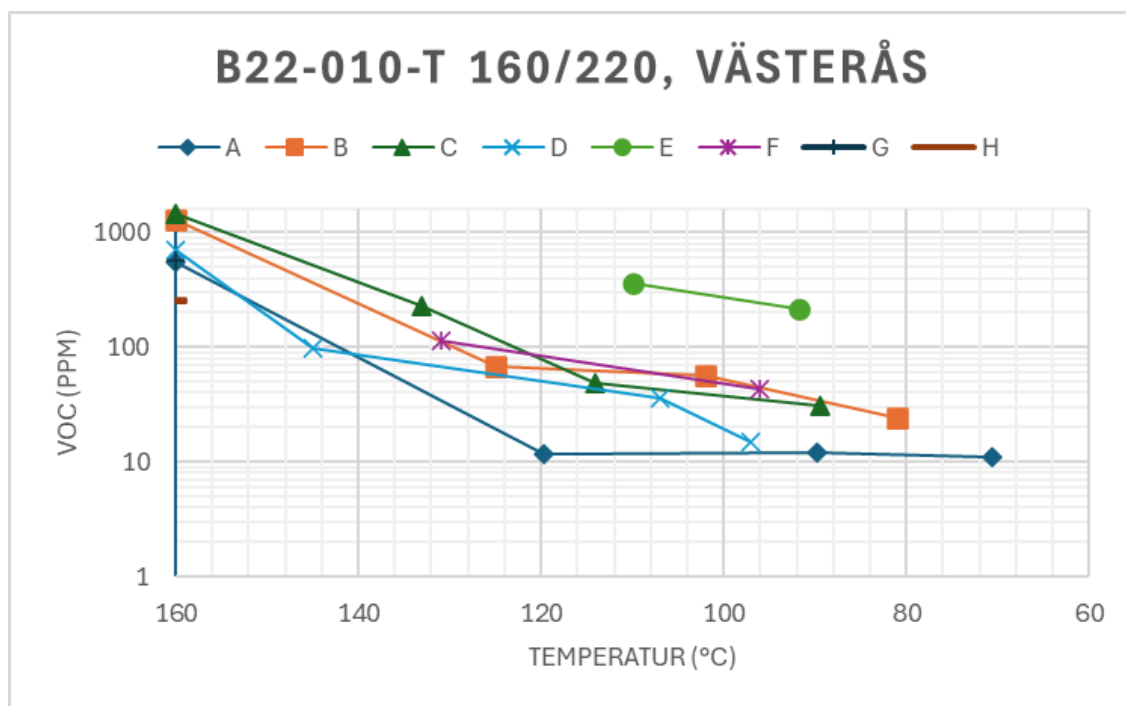
- innebär att ingen mätning genomfördes

x innebär att mätningen efter 1 minut var ännu ej planerad och genomfördes därför ej

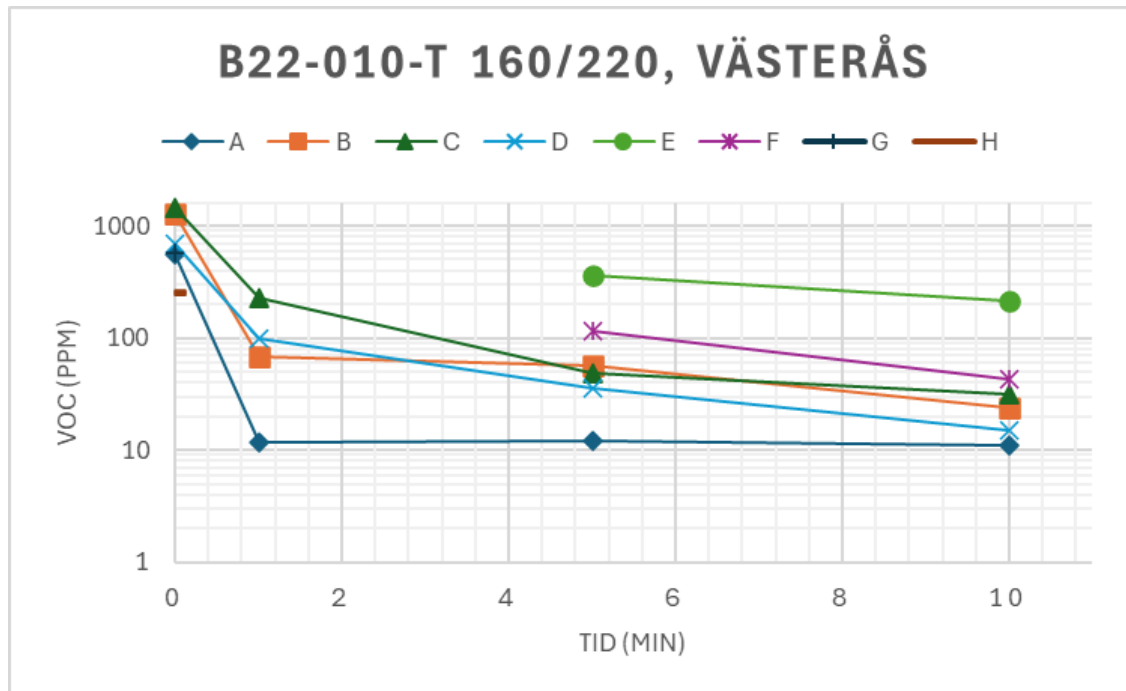
* innebär att ingen mätning för sista mätningen var under 10 ppm

4.2 Jämförelse av de olika testmetoderna

Figur 13 och 14 presenterar VOC-halter för bitumentypen B22-010-T (160/220, Västerås) i förhållande till avsvälningstemperaturen respektive avsvälningstiden för de olika delexperiment. I delexperimenten G och H genomfördes inga VOC mätningar under avsvälningen eftersom bitumenet i de 5010 cm³ stora burkarna behövde användas i delexperiment E och F. Därmed återfördes 5010 cm³ burkarna till ugnen för att säkerställa att bitumenet behöll sin temperatur. Resultaten visar en nedåtgående trend i VOC-halterna i takt med temperaturavsvälning och mättidens längd. Detta tyder på att VOC-halterna minskar när bitumenet svalnar eller att mängden VOC som kan avges minskar efter att ha släppts ut vid högre temperaturer. Efter en minuts mätning visade det sig att VOC-koncentrationerna i Figur 13 och 14 började jämnas ut sig efter avsvälningmätning vid 5 minuter.



Figur 13. Förhållandet mellan avsvälningstemperatur och VOC-utsläpp för alla delexperiment förutom H och G, för bitumentyp B22-010-T 160/220, Västerås.



Figur 14. Förhållandet mellan avsvälningstid och VOC utsläpp för alla delexperiment förutom H och G för bitumentyp B22-010-T 160/220, Västerås.

Temperaturen och VOC-halterna visade variationer över de olika delexperimenten. Enligt Figur 13 och 14 uppvisade delexperiment C den högsta VOC-halten vid den första mätningen (direkt efter att ha tagits ur ugnen), medan delexperiment A hade den lägsta VOC-halten. Detta beror på att experimentupställningen i delexperiment C hade en förbättrad metod utifrån lärdomarna från delexperiment A och B genom att en mindre tratt och en lasertermometer användes. Efter genomförandet av delexperimenten A, B och C visas det i Figur 13 och 14 att trattens storlek samt typen av termometer spelar roll för både temperaturen och VOC-halterna. Speciellt noterbart är att trattens storlek hade en påtaglig effekt på VOC-halter och temperaturen mellan delexperiment A och B. I delexperiment B, där en mindre tratt användes, noterades högre VOC-halter och långsammare avsvälning. Detta kan bero på att en stor tratt försvårar för VOC att nå öppningen, samt att trattens storlek

bidrar till avsvälning genom att blanda in kall luft med bitumens varma emissioner vilket leder till en snabbare avsvälning.

I jämförelsen mellan delexperiment B och C, som presenteras i Figur 13 och 14, observeras att bitumenet i delexperiment C hade en högre temperatur under avsvälningsprocessen och en större VOC-halt jämfört med delexperiment B. Orsaken till detta kan vara relaterad till att stavtermometern ersätts med lasertermometern. Stavtermometern leder till snabbare avsvälning och förlust av VOC-halter, eftersom mätmetoden innebär att termometerns stav sätts direkt i bitumenet och rörs om. Denna process stör proverna och blandar om luften, vilket påverkar både temperaturen och VOC-halten negativt. Å andra sidan möjliggör lasertermometern mätningen av ytan utan fysisk kontakt, vilket minskar störningen och bevarar både temperatur och VOC-halter på högre nivåer.

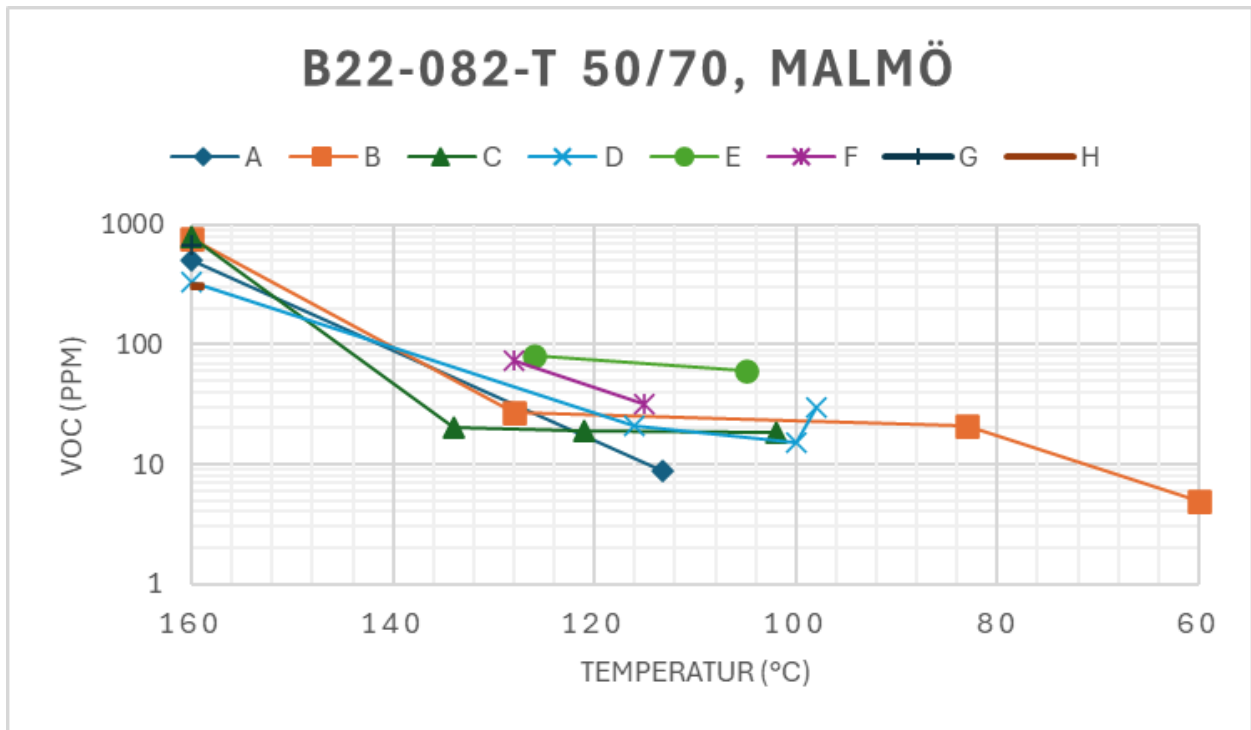
Delexperiment C och D genomfördes under samma förutsättningar och med samma utrustning, med den skillnaden att D innehöll 300 gram bitumen medan C innehöll 150 gram. Resultaten som visas i Figur 13 och 14 var både intressanta och överraskande. Trots förväntningar om en högre VOC-halt med större mängd bitumen, visade delexperiment D en lägre VOC-halt och snabbare avsvälning jämfört med C. Även om temperaturen förblev högre under avsvälningen i delexperiment D än i C, kan den oväntat lägre VOC-halten bero på att burken hade mindre luftvolym än 50 % av burkens volym, då cirka 55% av burken innehöll bitumen (se Tabell 3). Temperaturen bevarades bäst i delexperiment D i jämförelse med andra delexperiment, orsaken för detta kan vara den större bitumenmassan som utnyttjades i jämförelse med andra delexperiment. VOC-utsläppens långsamma nedgång kan beror på temperaturen, då högre temperatur kan avge större och mer konstant VOC-halt.

I Figur 13 och 14 framgår det att VOC-mätningarna för delexperiment E och F endast genomfördes under avsvälningen. Det är noterbart att delexperiment E uppvisade relativt högre VOC-halter jämfört med delexperiment A, B, C och D under avsvälningen, medan F visade liknande VOC-halter som de övriga delexperimenten. Figurerna visar även att delexperiment F hade en lägre VOC-halt men långsammare avsvälning jämfört med delexperiment E. Resultaten indikerar en trend där en större mängd bitumen leder till lägre VOC-halter och högre temperaturer jämfört med mindre mängder bitumen i samma behållarvolym. Denna observation är i linje med tidigare resultat från delexperiment C och D, vilka också hade samma förhållanden men olika bitumenmassor, och ledde till samma slutsatser.

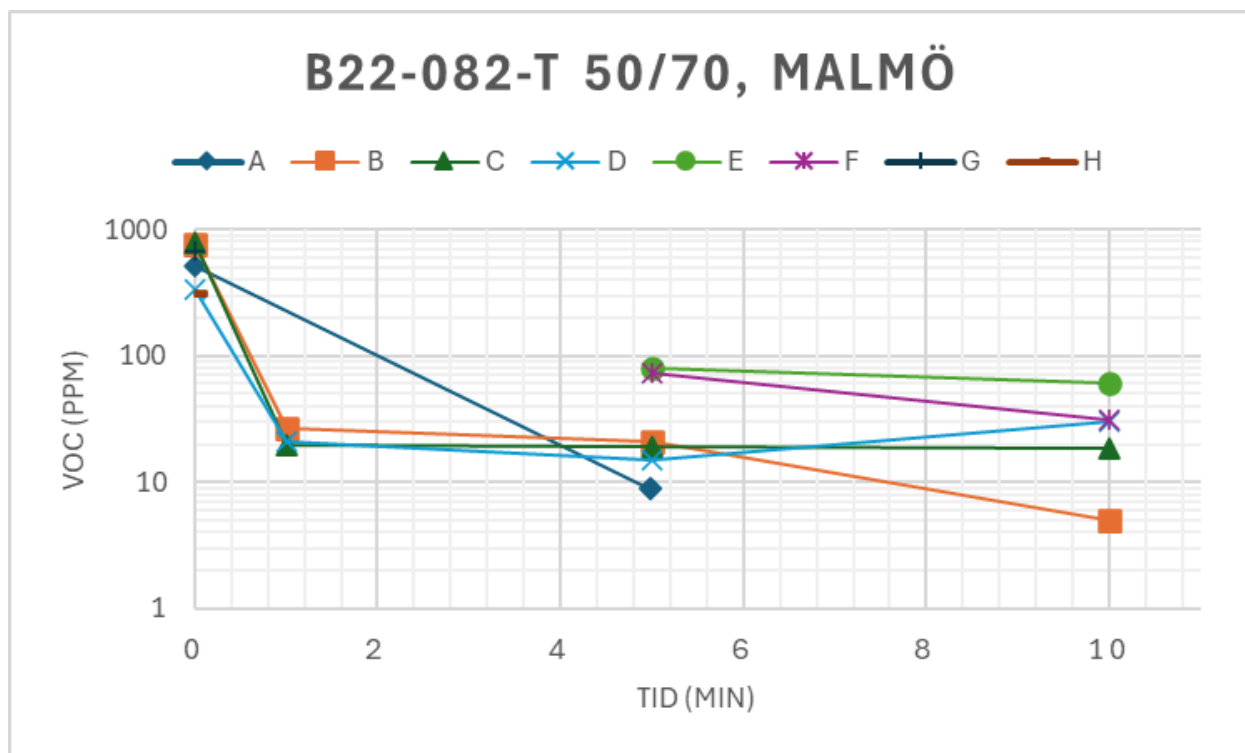
De direktuppmätta resultaten från delexperimenten G och H indikerar att H, som hade en större mängd bitumen, avger lägre VOC-halter jämfört med G. Intressant nog uppvisade delexperiment H även de lägsta VOC-halterna bland alla delexperimenten. Det är intressant att se en större bitumenmassa med lägst VOC-halt i jämförelse med betydligt mindre bitumenmassor i andra delexperiment med högre VOC-halter. Detta kan tyda på att större bitumenvolym i förhållande till burkens storlek inte nödvändigtvis leder till högre VOC-halter. Denna observation framkommer tydligt vid jämförelse av de olika delexperimenten med varierande bitumenmassor.

Figur 15 och 16 illustrerar hur VOC-halten för bitumentypen B22-082-T (50/70, Malmö) varierar med avsvälningstemperaturen och avsvälningstiden i de olika delexperimenten. VOC-halterna minskar efter den första mätningen, och värdena börjar jämna sig under avsvälningen alltså efter 5 och 10 minuter. Det är värt att

notera att alla uppmätta VOC-halter under avsvälningen är under 100 ppm, vilket är intressant. Vidare saknas mätdata för 1 minut och 10 minuter i del experiment A på grund av tidigare nämnda skäl.



Figur 15. Förhållandet mellan avsvälningstemperatur och VOC-halten för alla del experiment förutom H och G för bitumentyp B22-082-T 50/70, Malmö.



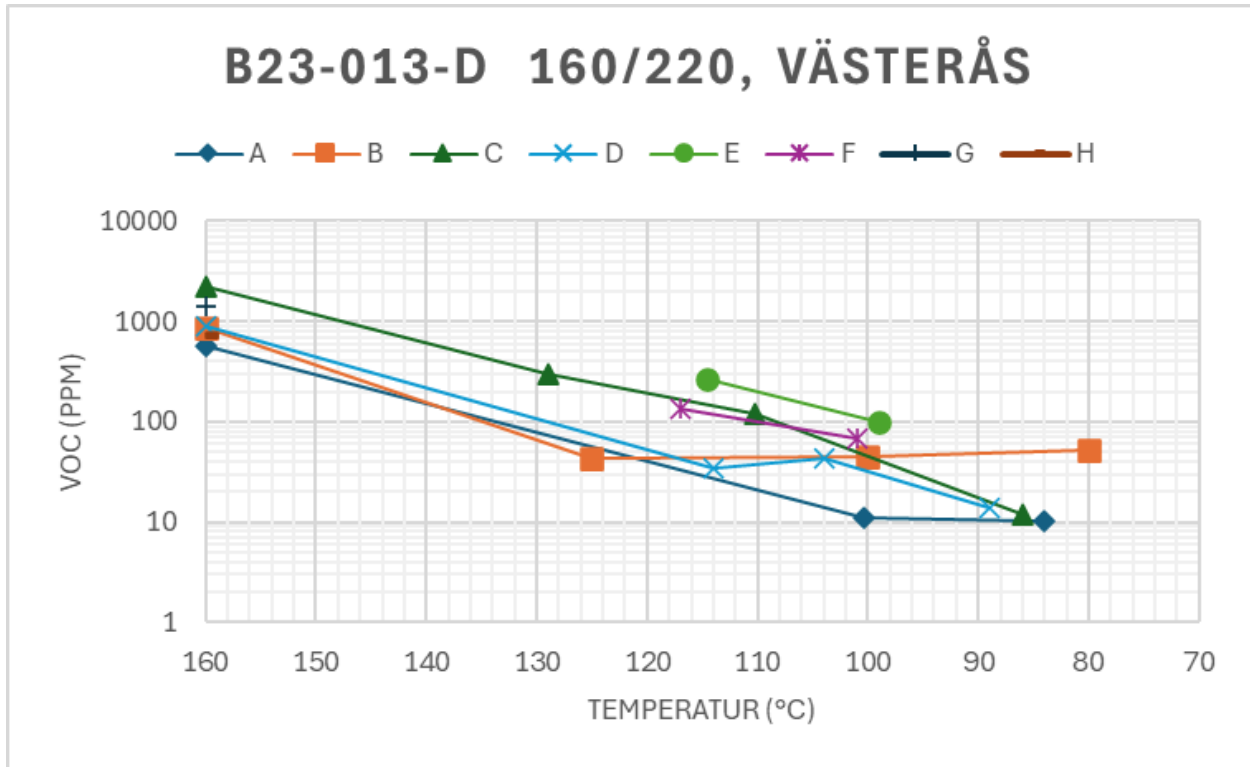
Figur 16. Förhållandet mellan avsvälningstid och VOC-halten för alla delexperiment förutom H och G, för bitumentyp B22-082-T 50/70, Malmö.

Figur 15 och 16 visar att delexperiment C och B uppvisade de högsta VOC-halterna vid direkt mätning, där C visade något högre VOC-halt än B. Delexperiment D å andra sidan, visade den lägsta VOC-halten, och dessa värden var lägre jämfört med de andra delexperimenten. Trots liknande förutsättningar hade delexperiment D en lägre VOC-halt jämfört med C, vilket är anmärkningsvärt med tanke på att D innehöll dubbelt så mycket bitumen. Under avsvälningmätning processen noterades en markant avsvälning i delexperiment B, vilket skiljer sig från tidigare Figur 13 och 14. Vidare visade mätningar under avsvälningen att VOC-halten förblev jämn i både delexperiment B och C, möjligtvis påverkat av trattens storlek. Speciellt delexperiment C uppvisade mer stabila VOC-halter under avsvälningen jämfört med B, där stavtermometern kan ha varit en bidragande faktor.

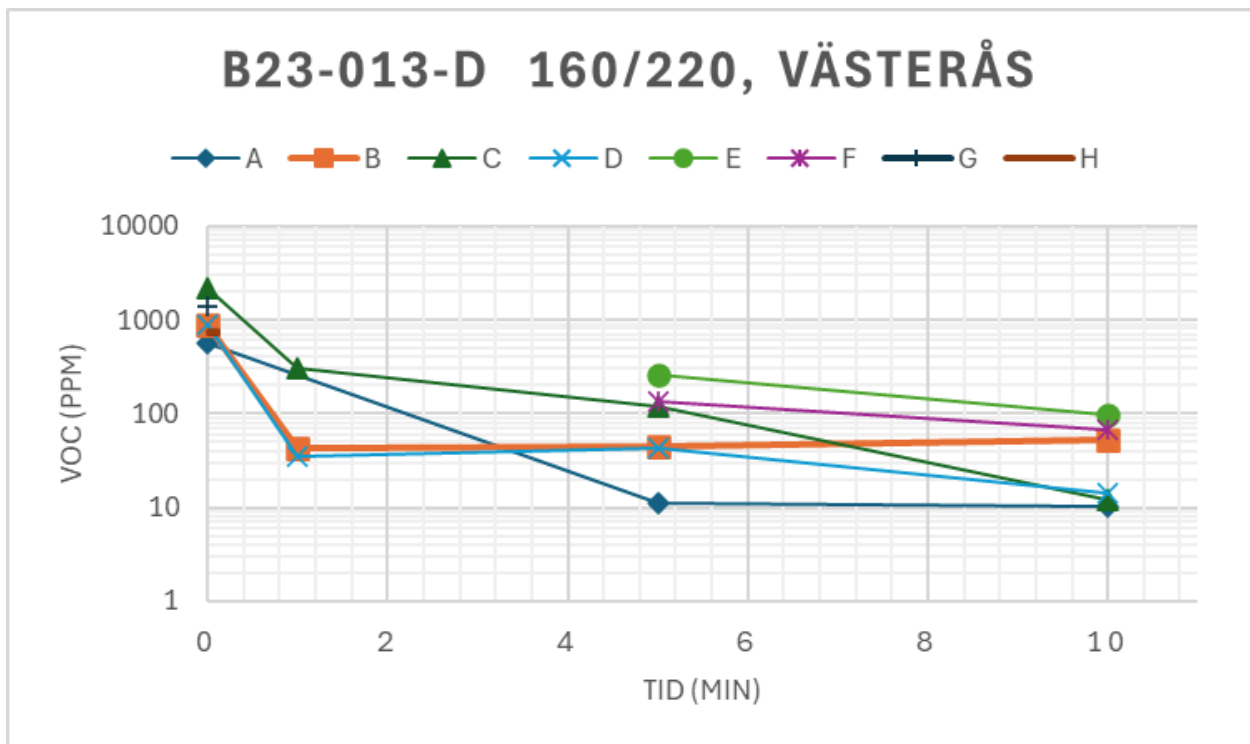
Delexperimenten E och F uppvisar nästan samma VOC-halter och temperaturer, trots skillnader i bitumens volym. Vid mätningen efter 5 minuter började VOC-halten i F att minska, samtidigt som temperaturen bevarades mer effektivt jämfört med E. Detta antyder att en större volym bitumen kan bidra till en lägre VOC-halt och långsammare avsvaning, vilket även observerades i delexperimenten C och D.

Resultaten från delexperiment G och H indikerar att H har en lägre VOC-halt jämfört med G. I jämförelse med resultaten som presenteras i Figur 13 och 14, observeras att delexperiment H konsekvent uppvisar en lägre VOC-halt än delexperiment G. Specifikt närmar sig delexperiment H en VOC-halt på omkring 300 ppm, vilket är i linje med de värden som rapporteras i båda Figureerna, medan G uppvisar avvikande VOC-halter.

Figur 17 och 18 visar VOC-halterna för bitumentypen B23-013-D (160/220, Västerås) och deras förhållande till avsvaningstemperaturen och avsvaningstiden för de olika delexperiment. En återkommande observation i Figureerna för de andra två bitumentyperna är en tydlig minskning av VOC-halterna efter direkt mätningen. Vidare visas det att vid den avslutande avsvaningsmätningen, som genomfördes efter 10 minuter, tenderar VOC-halterna att vara nästan lika för delexperiment A, C och D.



Figur 17. Förhållandet mellan avsvälningstemperatur och VOC-halten för alla delexperiment förutom H och G, för bitumentyp B23-013-D 160/220, Västerås.



Figur 18. Förhållandet mellan avsvälningstid och VOC-halten för alla delexperiment förutom H och G, för bitumentyp B23-013-D 160/220, Västerås.

Vidare analys av delexperimenten A till D visar att C konsekvent uppvisar de högsta VOC-halterna vid direkt mätningen i samtliga Figurer. Delexperiment C visar även den största minskningen av VOC-halter bland alla delexperiment, vilket tydligt syns efter direkt mätningen. Specifikt noteras att VOC-halten i delexperiment C uppgår till 2200 ppm vid direkt mätningen, vilket är det högsta värdet som noterats i hela experimentet och anses vara relativt högt jämfört med värdena i Figur 13, 14, 15 och 16. Det är även noterbart att skillnaden i VOC-halter mellan delexperiment B och C vid direkt mätningen är betydande då delexperiment B hade 877 ppm. Delexperiment A uppvisar den lägsta VOC-halten jämfört med de övriga delexperimenten.

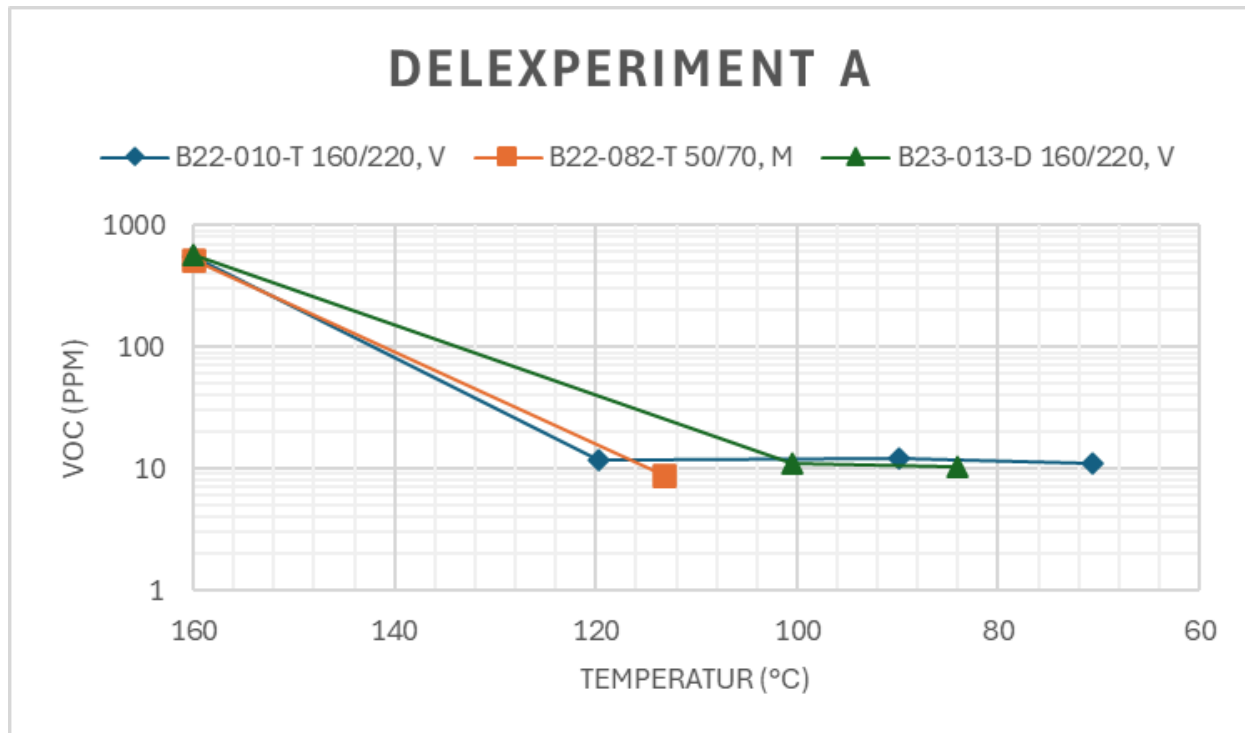
Det framgår att delexperiment B och D har ungefär samma VOC-halter vid direkt mätningen. Vidare noteras att delexperimenten A, C och D har ungefär samma temperatur vid den sista avsvälningmätning (efter 10 minuter). Det är också värt att notera att delexperiment B hade en relativt hög temperatur vid den första avsvälningmätningen, men visade sig ha den lägsta temperaturen vid den sista mätningen. En ytterligare observation är att delexperiment D har en relativt låg temperatur vid den första avsvälningmätning (efter 1 minut). Delexperiment D bibehöll sin temperatur väl i Figur 13 och 14, medan den sjönk i Figur 15, 16, 17 och 18.

Vidare observeras delexperimenten E och F, där E uppvisar högre VOC vid första avsvälningmätning (efter 5 minuter) och större temperaturförlust jämfört med F, trots att F innehåller dubbelt så mycket bitumen som E. Intressant nog, vid den

andra avsvlningsmätningen (efter 10 minuter) har E och F nästan samma VOC-halter och temperaturer. För delexperimenten G och H, noteras att H konsekvent uppvisar lägre VOC-halter än G, vilket gäller för samtliga bitumentyper. Resultaten för Figur 17 och 18 indikerar att VOC-halterna för G och H är höga i jämförelse med de andra bitumentyperna.

Resultatet i Figur 19 nedan är något svårt att jämföra på grund av att inte alla avsvlningsmätningar kunde genomföras av tidigare nämnda skäl. Bitumentypen 50/70 har endast två mätningar (direkt- och efter 5 minuters mätning). Dessa mätresultat kommer att jämföras med motsvarande mätningar för andra bitumentyper. Det noteras i Figur 19 att VOC-halterna är relativt lika vid direkt mätning och avsvlningsmätning (efter 5 minuter). Temperaturen å andra sidan skiljer sig efter 5 minuters mätning mellan de olika bitumentyperna, där noteras att bitumentypen 50/70 har långsammare avsvlning.

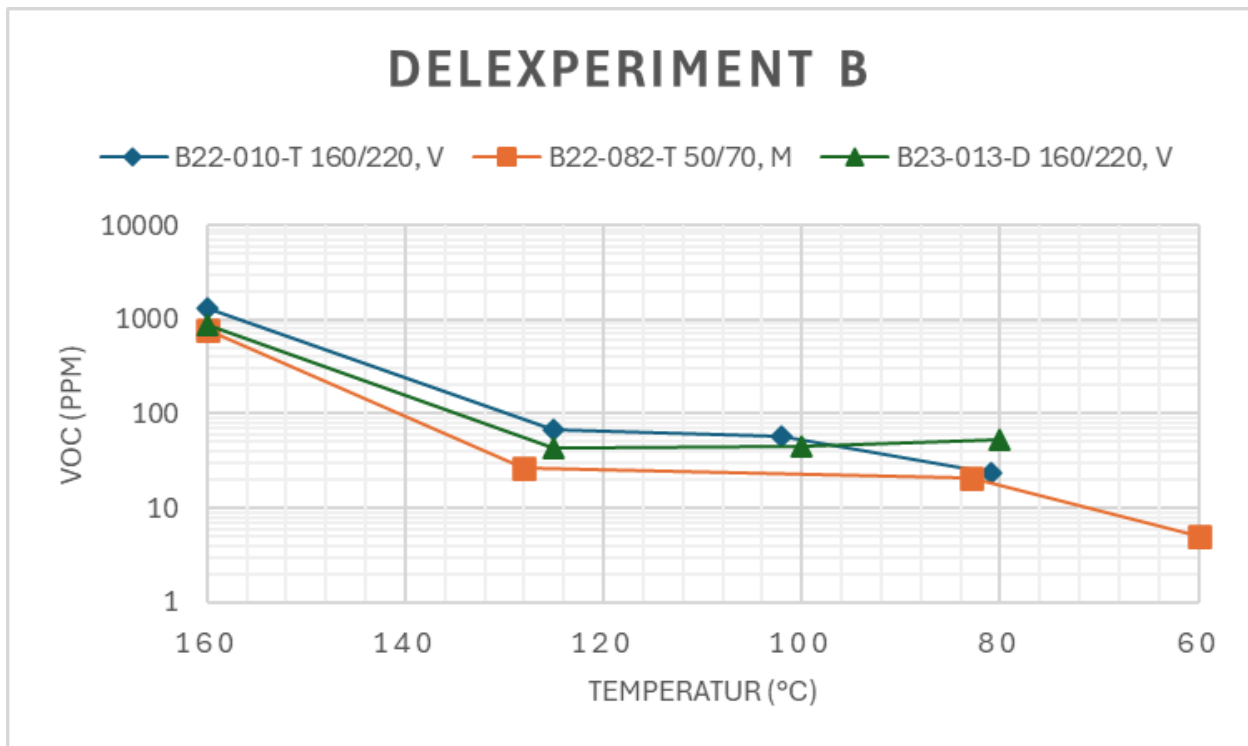
- B23-013-D 160/220, Västerås - hade högst VOC-halter
- Det är svårt att bedöma riktigt vilket bitumentyp hade den långsammaste avsvlning.



Figur 19. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment A.

I Figur 20 nedan uppvisade bitumentypen 50/70 de lägsta VOC-halterna, medan T 160/220 hade de högsta bland de undersökta bitumentyperna. Under avsvlningsmätningarna visade det sig att skillnaderna i VOC-halter minskade till ungefär under 100 ppm. Vid den första avsvlningsmätningen (efter en minut) noterades att alla bitumentyper avgav ungefär lika höga VOC-halter, medan temperaturen låg på cirka 130 °C. För bitumentypen 50/70 sjönk avsvlnings temperaturen markant, särskilt vid den sista mätningen. I början var temperaturen liknande andra bitumentyper, men med tiden blev temperaturskillnaderna allt större.

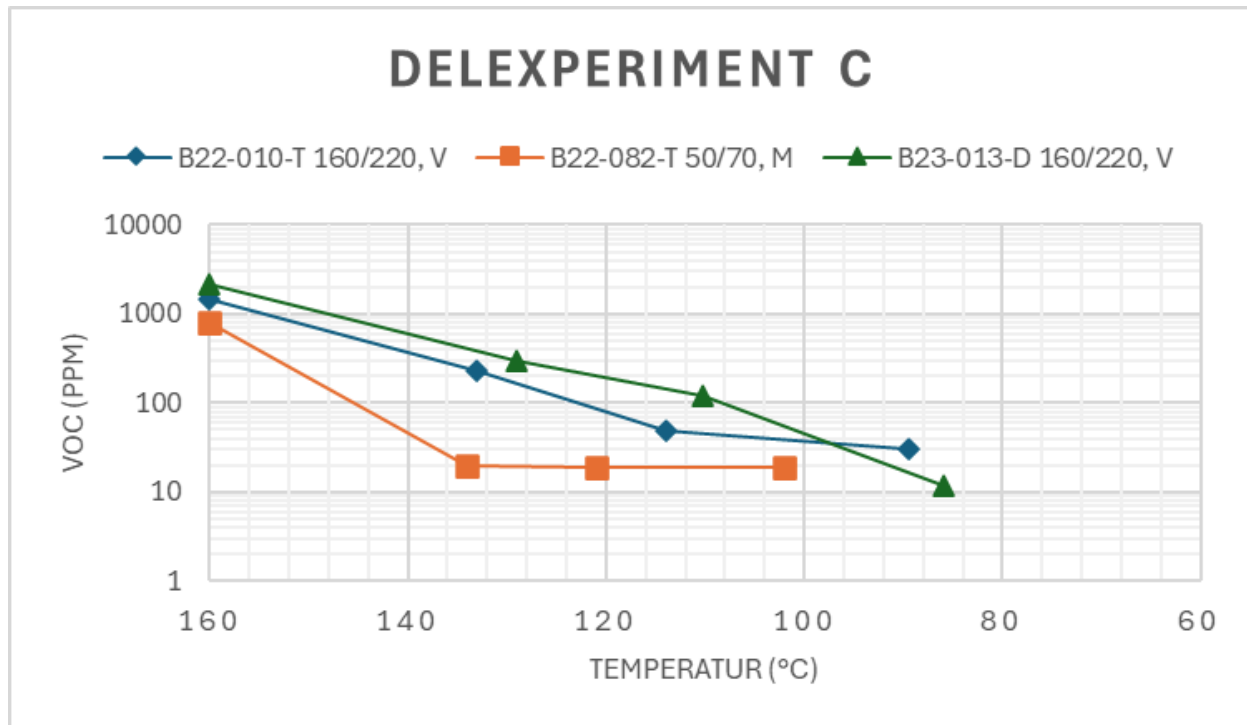
- B22-010-T 160/220, Västerås - hade högst VOC-halter
- B22-010-T 160/220, Västerås - hade långsammare avsvlning än samtliga bitumentyper.



Figur 20. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment B.

Nedan observerades i Figur 21 att bitumentypen D 160/220 hade de högsta VOC-halterna jämfört med andra bitumentyper. Intressant nog visade det sig att denna typ förlorade temperatur snabbare än andra bitumentyper under avsvälningen. Bitumentypen 50/70 visade å andra sidan de lägsta VOC-halterna samt att den hade långsammare avsvälningen jämfört med de andra två bitumentyper.

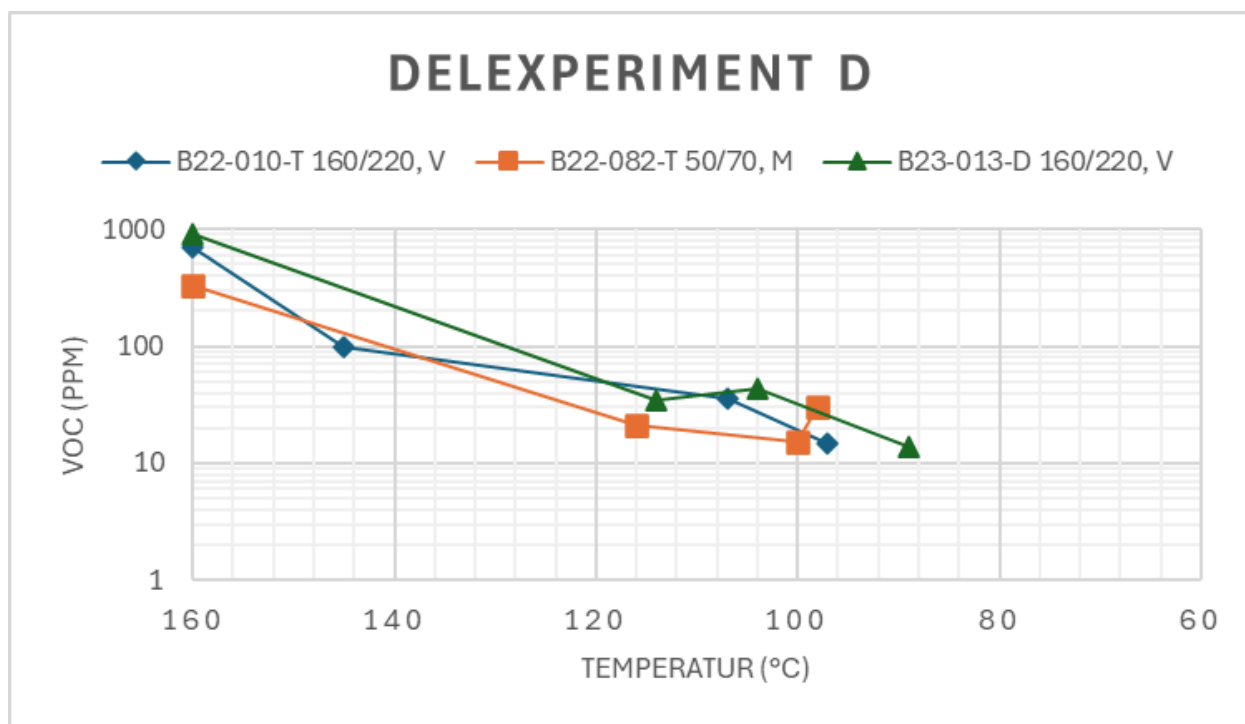
- B23-013-D 160/220, Västerås - hade högst VOC-halter
- B22-082-T 50/70, Malmö - hade långsammare avsvälning än samtliga bitumentyper.



Figur 21. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment C.

I Figur 22 observeras likheter med Figur 21, där det märks att beteendet gällande VOC-halter är likadana för bitumentyperna. Detta resulterar i att de högsta VOC-halterna fortfarande uppvisas av D 160/220, medan de lägsta noteras hos T 50/70. Vad gäller temperaturegenskaperna, skiljer sig bitumentyperna. Vid den första avsvalningsmätning bevaras temperaturen relativt utmärkt av T 160/220, men i slutändan följs mönstret som i Figur 21, där avsvälningen är långsammast för T 50/70.

- B23-013-D 160/220, Västerås - hade högst VOC-halter
- B22-082-T 50/70, Malmö - hade långsammare avsvälning än samtliga bitumentyper.

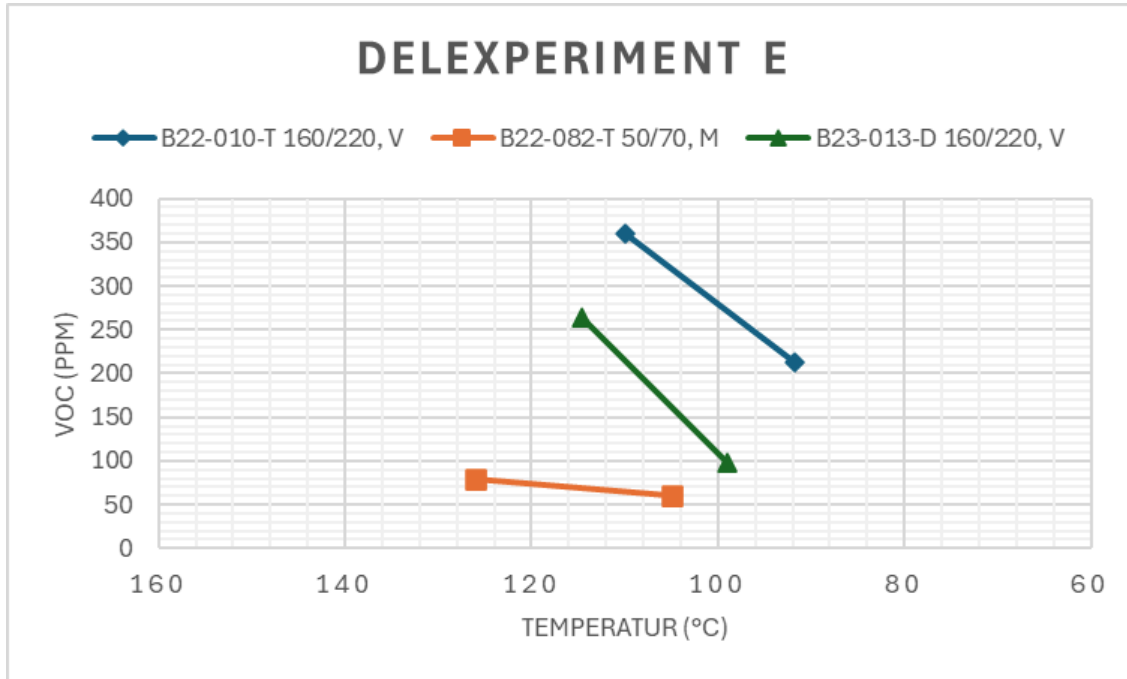


Figur 22. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment D.

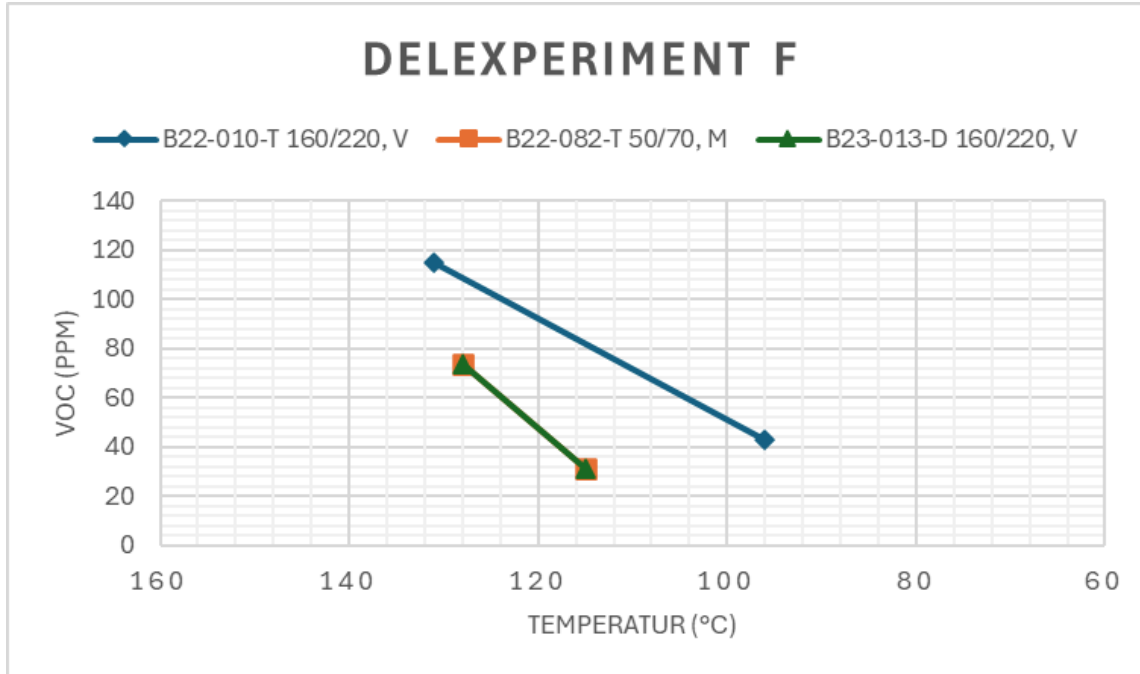
I Figur 23 och 24 presenteras olika bitumentyper som uppvisar betydande skillnader i VOC-halter, trots att de använde samma burk storlek men hade olika bitumenmassor. Vad gäller temperaturer observeras dock likheter mellan Figurerna, med temperaturen som generellt varierar mellan 90 °C och 110 °C för alla bitumentyper. Specifikt visar bitumentypen T 160/220 på högsta VOC-utsläpp jämfört med de andra typerna i både Figur 23 och 24. Bitumentyperna 50/70 och D 160/220 uppvisade olika VOC-halter och temperaturer i Figur 23. När mängden bitumen dubblerades i delexperiment F (Figur 24), återspeglades detta i nästan identiska VOC-halter och stabil temperatur mellan bitumentyperna 50/70 och D 160/220.

- B23-013-T 160/220, Västerås - hade högst VOC-halter i båda Figurerna.

- B22-082-T 50/70, Malmö - hade långsammare avsvälning än samtliga bitumentyper i Figur 23.
- B22-082-T 50/70, Malmö och B23-013-D 16/220, Västerås - hade långsammare avsvälning än samtliga bitumentyper i Figur 24.



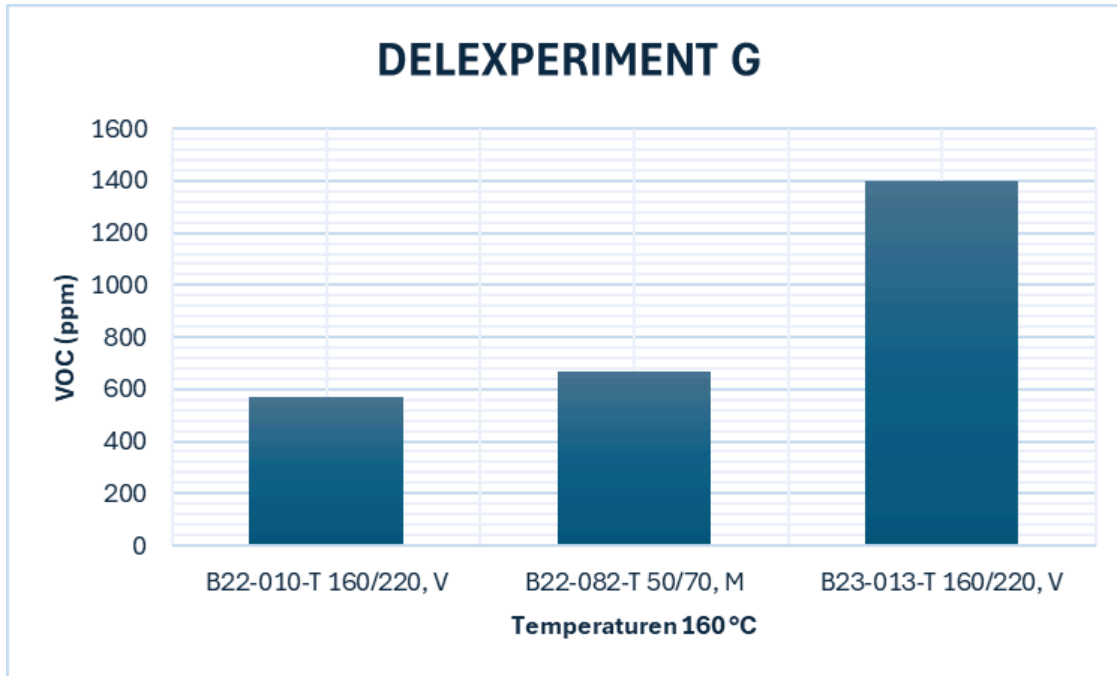
Figur 23. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment E.



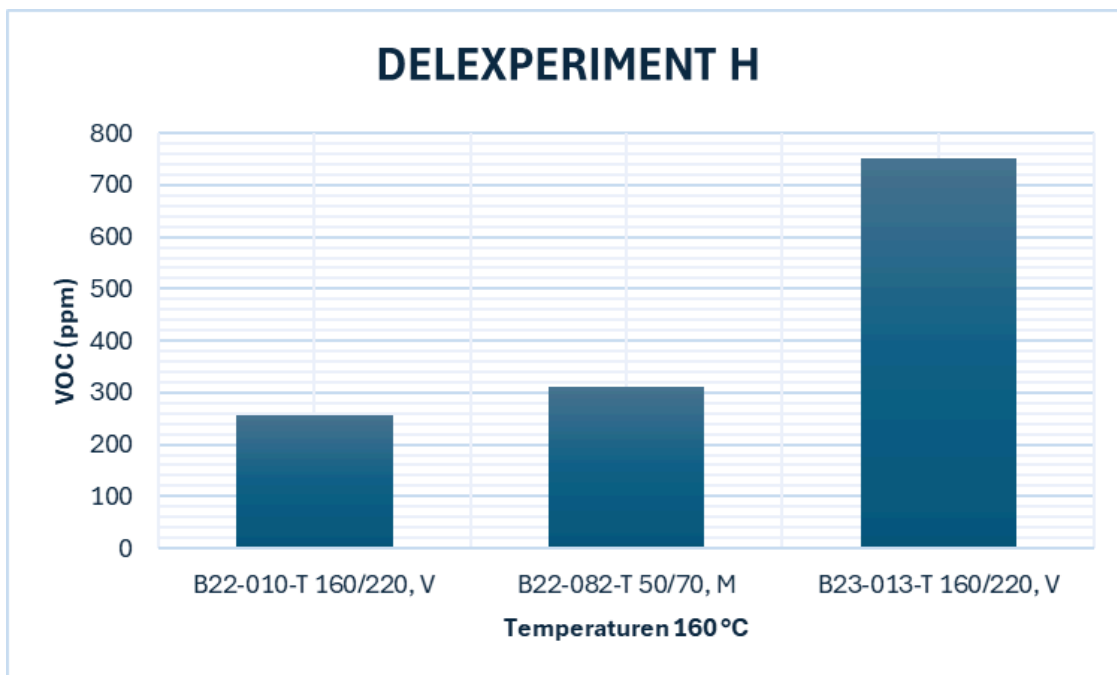
Figur 24. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment F.

I Figur 25 och 26 blir det tydligt att endast direkta mätningar utförts, utan att någon avsvlningsprocess beaktats i mätningarna. Resultaten visar betydande skillnader i VOC-halter; det är anmärkningsvärt att nästan alla bitumentyper visade på dubbla VOC-halter i Figur 25 jämfört med Figur 26. Det är även intressant att notera att skillnaderna i VOC-nivåer mellan de olika bitumentyperna var nästan lika stora i båda Figurerna.

- B23-013-D 16/220, Västerås - hade högst VOC-halter i Figur 25 och 26.
- B22-010-T 160/220, Västerås- hade lägst VOC-halter i Figur 25 och 26.



Figur 25. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment G.



Figur 26. Förhållandet mellan temperaturen och VOC-halten för alla bitumentyper i delexperiment H.

4.3 Faktorer som påverkar resultatet

Experimentet visar att VOC-halten är relaterad till flera faktorer, där varje ändring kan leda till varierande resultat. Trattens storlek, temperaturen, val av termometer, bitumenmassan och bitumens förhållande till luftmängden i burken är de faktorer som hade bidragit till förändringar i VOC-halter och avsvälningen.

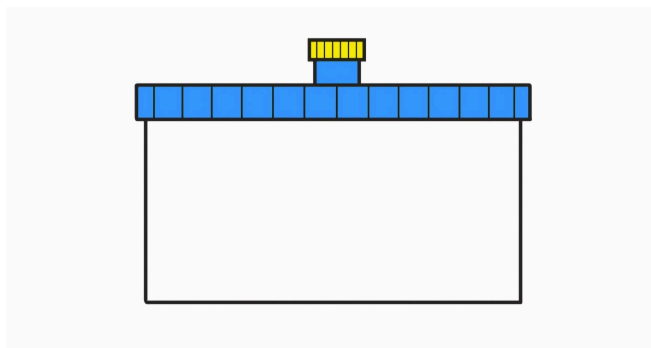
Experimentet visar hur temperaturen påverkar VOC-halterna. Resultaten från alla delexperiment visar en minskning av VOC-halterna under avsvälningmätningar. Experimentets resultat indikerar att lägre bitumens temperatur leder till minskade VOC-halter. Ju varmare bitumenet är desto mer VOC-halter avges som bekräftas vid direktmätningen vid 160 °C där högre halter noterades jämfört med lägre temperaturer vid avsvälningprocessen. Detta kan delvis förklaras av att bitumenet förlorar en del VOC vid direkt mätningen, vilket resulterar i en långsammare generering av VOC i kommande mätningar (avsvälningmätningar).

Generellt anses temperaturen som en viktig parameter för mätningen av VOC-halter. Enligt Wang et al. (2019) finns ett starkt samband mellan temperaturen och VOC-halter med en potentiell ökning av VOC-halterna med 3–7 gånger vid en temperaturhöjning om 20 °C.

Tanken med tratten är att samla och leda VOC-emissioner från varm bitumen till dess öppning för att möjliggöra en effektiv mätning av VOC-halter. Två olika trattstorlekar testades för att undersöka om storleken påverkar resultaten från VOC-mätaren. Resultaten visade att storleken har betydelse där en mindre tratt resulterar i högre VOC-halter jämfört med en större tratt. Den större tratten resulterade även i mindre avsvälning jämfört med den mindre tratten, vilket

möjligen beror på att den större tratten exponerar bitumenet för kallare luft vilket ger en snabbare avsvälning av bitumenet och kan därmed leda till lägre VOC-halter. Dessutom kan den större tratten genom sin volym orsaka en expansion av de koncentrerade VOC-emissionerna, vilket kan leda till missvisande resultat.

I delexperimenten E och F, där inga trattar användes utan mätningar utfördes direkt från en burk med delvis stängt lock, observerades högre VOC-halter samt långsammare avsvälning. Detta antyder att VOC-emissioner inte blandas med kallare luft, vilket upprätthåller en stabil miljö inuti burken utan yttre störningar. Ett alternativ kunde vara att använda ett metalllock som funkar som en tratt och är anpassad till burkens storlek samt kan skruvas fast på burken, med ett lock på öppningen (se Figur 27). Detta skulle möjliggöra att tratten och bitumen värms tillsammans utan att exponeras för omgivningen och därmed ledas VOC-emissionerna till trattens öppning utan kallluftsblandning. Med denna lösning kan både VOC-halter och temperaturen bevaras mer effektivt.



Figur 27. En illustration över hur en bättre ersättning för en tratt ska se ut. Blå är metallocket för burken, Gul metallocket för öppningen.

Termometrar används för att mäta temperaturen på bitumen vid varje VOC-mätning. För att undersöka om termometertypen påverkar resultaten av VOC-halterna och temperaturen, användes två olika sorters termometrar. I

experimenten A och B användes en stavtermometer, men på grund av den snabba minskningen av både temperatur och VOC-halter beslutades det att använda en lasertermometer för resterande mätningar. Detta för att undvika den störning som uppstod med stavtermometern under utförandet. Resultaten tyder på att valet av termometer är en kritisk faktor. Användningen av en stavtermometer leder till förluster av både VOC och temperatur, eftersom mätprocessen, där stavtermometern sätts in i bitumenet och omrörs, varar i 30 sekunder. Däremot indikerar resultaten att en lasertemometer verkar erbjuda en mer effektiv metod som tar cirka 3 sekunder vilket bevarar både temperatur och VOC-halter. Tack vare användningen av lasertemometer bidrar det till ökad tidseffektivitet och mätnoggrannhet jämfört med stavtermometer.

I experimentet fylldes burkar med varierande mängder bitumen för att undersöka sambandet mellan bitumenmassan och VOC-halter. Resultaten från delexperiment H visade att en bitumenmassa på 2000 gram ledde till betydligt lägre VOC-halter jämfört med de andra delexperimenten där mindre mängder bitumen användes. Vidare observerades det att prov med större mängder bitumen konsekvent uppvisade lägre VOC-halter än de med mindre mängder under samma förutsättningar. Till exempel hade delexperiment D lägre VOC-halter jämfört med delexperiment C, trots identiska experimentella förutsättningar men en mindre mängd bitumen i C. Likaså uppvisade delexperiment F lägre VOC-halter än E, även här med större bitumenmassa i F. Dessa observationer bekräftar ett tydligt samband, ju större mängd bitumen i en burk, desto lägre VOC-halter avges.

Under experimentet observerades att majoriteten av burkarna öppnades plötsligt efter cirka 35 – 45 minuters uppvärmning i temperaturen 160 °C. Denna händelse, där locket flög av burken, orsakades av en tryckökning i den slutna burken på

grund av VOC-halterna vilket resulterade i att VOC-halten släpptes ut i ugnen. Det är svårt att bedöma effekten av dessa händelser, men en jämförelse mellan delexperiment C och D ger en viss insikt. Båda experimenten hade samma förutsättningar förutom att delexperiment D innehöll dubbla mängden bitumen jämfört med C. Trots detta flög locket av i delexperiment C men inte i D där resultatet visade att C hade högre VOC-halter än D. Detta antyder att lockets flykt antingen inte påverkar VOC-halterna eller att den större mängden bitumen i delexperiment D motverkade lockets flykt. Alternativt kunde resultatet ha varit ännu högre i delexperiment C om lockets flykt hade inte inträffat.

Det är avgörande att utforska om valet av bitumentyp kan påverka VOC-halterna. Det framgår att bitumentypen B23-013-D 160/220, Västerås uppvisade de högsta VOC-halterna i nästan alla delar av experimentet, men den hade en snabb avsvälning. I delexperiment C avvek denna bitumentyp markant från de mönster som observerades i delexperiment A och B med en tydlig ökning av VOC-utsläppen, för att sedan återgå till tidigare mönster vad gäller VOC-halter i delexperiment D.

Å andra sidan visade bitumentypen B22-010-T 160/220, Västerås varierande VOC-halter och uppvisade inget konsekvent mönster för VOC-utsläpp under olika förhållanden. Det framkom att bitumentypen B22-082-T 50/70, Malmö konsekvent hade de lägsta VOC-halterna oavsett experimentförhållanden, intressant nog hade den bitumentypen en långsammare avsvälning jämfört med andra bitumtyper.

Dessa resultat bekräftar att bitumentypen spelar en avgörande roll för VOC-utsläppen eftersom olika typer genererar varierande mängder VOC och har olika förmåga att bevara temperaturen. Experimentet visade även att alla

bitumentyper svarade väl på samma mätmetod, vilket tyder på att det är lämpligt att använda samma metod för att mäta VOC-halterna hos de bitumentyper som ingick i experimentet.

4.4 Felkällor

Under experimentet upptäcks olika felkällor som kan påverka experimentets noggrannhet och tillförlitlighet. Nedan identifieras och diskuteras specifika felkällor som observerades under och efter experimentet. Dessa felkällor är beroende av den utrustning och metodik som använts för att mäta temperaturer och VOC-halter i bitumen. Det är avgörande att dessa felkällor identifieras och hanteras för att kunna förbättra noggrannheten i mätmetoderna i framtida studier. Genom analys av dessa felkällor, deras inverkan på experimenten och de åtgärder som krävs för att minimera sådana fel, kan experimentets utförande förbättras och mer tillförlitliga data kan tillhandahållas för framtida forskning inom detta område.

Användningen av en stavtermometer för temperaturmätning av varm bitumen leder till snabbare avsvälning och förlust av VOC-halter. Varje temperaturmätning, som tar cirka 30 sekunder, resulterar i en mindre mängd bitumen som fastnar på staven. Denna mängd, även om den är liten per mätning, kan ackumulera över flera tester och påverka mätresultaten. Genom att bitumen fastnar på staven och torkas bort minskar mängden bitumen något vid varje temperaturmätning, vilket kan leda till felkällor i långsiktiga studier. Det är viktigt att notera att den exakta mängden bitumen som fastnar på staven och dess påverkan på VOC-halterna bör kvantifieras genom anpassade experiment för att ge en mer exakt uppskattning av felkällorna. I delexperiment C, där stavtermometern ersattes med en lasertermometer, observerades betydligt högre VOC-halter och långsammare avsvälning. Detta tyder på att lasertermometern, som är en icke-kontaktbaserad mätmetod, eliminerar

fysisk interaktion med bitumen och därmed bevarar både VOC-halterna och temperaturen mer effektivt.

En lasertermometer mäter endast yttemperaturen, vilket innebär att den inte ger en korrekt bild av bitumenets inre temperatur utan endast ytan som är i kontakt med luften. Dessutom tas tratten bort vid mätningen, vilket leder till att bitumenet exponeras för luft. Detta resulterar i en förlust av både VOCn och värme, dock inte i samma omfattning som med stavtermometern. Anledningen till detta är att exponeringstiden med lasertermometern är betydligt kortare än med en stavtermometer, då lasertermometern tar cirka 3 sekunder att mäta temperaturen jämfört med 30 sekunder för stavtermometern. Dessutom är det troligt att temperaturen i bitumenets kärna är högre än vad som mäts på ytan eftersom bitumenets inre massa har mindre exponering för omgivande lufttemperatur och avsvälningseffekter från burkens metallsidor.

I delexperimenten A till D täcktes tratten med en metallbit (se Figur 10) som alternativ till ett lämpligt lock, vilket ledde till att tratten inte kunde förslutas helt. Detta tillstånd tillät potentiellt VOC att läcka ut, vilket kan ha haft en betydande påverkan på mätresultaten då VOC-halterna blir lägre än de faktiska halterna i bitumen. För att bedöma hur mycket detta påverkade resultaten kan jämförelser göras mellan VOC-halterna i delexperimenten A till D och delexperimenten E och F. Resultats observationer visar att VOC-halterna konsekvent var lägre i delexperiment A till D där tester hade en tratt med en metallbit på som ett lock. För att undvika felkällor som denna och förbättra mätningens noggrannhet bör korrekt förslutning av alla behållare säkerställs i framtida experiment.

För att testa effektiviteten av VOC-mätaren ION Tiger XT utfördes ett kontrolltest, då 150 gram bitumen upphettades på en spis vid en temperatur på cirka 225 °C i 5 minuter med en tratt på. VOC-halten mättes då bitumenprovet fortfarande värmdes på spisen. En snabb ökning noterades av VOC-halterna till cirka 450 ppm, varefter mätningen avbröts. Trots att ingen nära källa till VOC förekom, VOC-mätaren uppvisade fortfarande en mätning på cirka 150 ppm. Denna situation kvarstod tills filtret i mätaren byttes ut vilket indikerar att en ackumulering av VOC-halter hade fastnat i filtret och påverkade mätresultaten.

Denna ackumulering i filtret visar på att höga VOC-halter kan kontaminera VOC-mätarens filter, vilket leder till felaktiga avläsningar i kommande mätningar. Kontamineringen uppstår när VOC-partiklar fångas och lagras i filtret vilket resulterar i att VOC-mätaren läser fortfarande av VOC-partiklar även efter att VOC-källan har tagits bort. Efter att filtret byts ut började VOC-mätaren att avläsa VOC-nivåer som tidigare vilket bekräftar att kontaminerat filter hade varit en felkälla. Det framgår av testet att regelbundet filterbytet är viktigt för att hålla mätningarna mer exakta och pålitliga.

Metallhuvan, som är kopplad till röret och används för att täcka trattens öppning (som visas i Figur 8) var lite för stor vilket innebar att den inte satt tätt mot öppningen. Denna dåliga passform kunde leda till att inte all VOC från bitumenröken fångades upp av VOC-mätaren. Detta kunde resultera i att mätningen visar lägre VOC-halter än de som faktiskt fanns, vilket kan leda till underskattning av VOC-halterna vid mätningen. Därför är det nödvändigt att ha en anpassad metallhuva för trattens öppning.

Under experimentets gång observerades att andelen bitumen i förhållande till luftvolymen i burken påverkar mängden VOC-halter som genereras. I delexperiment C noterades att VOC-halten var högst bland alla delexperiment. Intressant nog var VOC-halten som högst vid direkt mätningen i delexperiment C. Därefter infördes en tratt, vilket ledde till en tydlig minskning av VOC-halten. Detta kan tyda på att den ursprungliga andelen bitumen i burken var mer effektiv i förhållande till luftvolymen, då bitumenet utgjorde cirka 27% av burkens volym. När tratten lades till minskade andelen bitumen till cirka 19% eftersom tratten tillförde 260 cm³ luftvolym. Ökningen av luftvolymen i burken ledde till att VOC-halten i delexperiment C minskade från 2200 till 303 ppm (se Figur 17). Detta förklarar att en bitumenandel på 27% är den mest relevanta att ta hänsyn till vid framtida experiment inom området.

4.5 Utveckling av mätmetoden

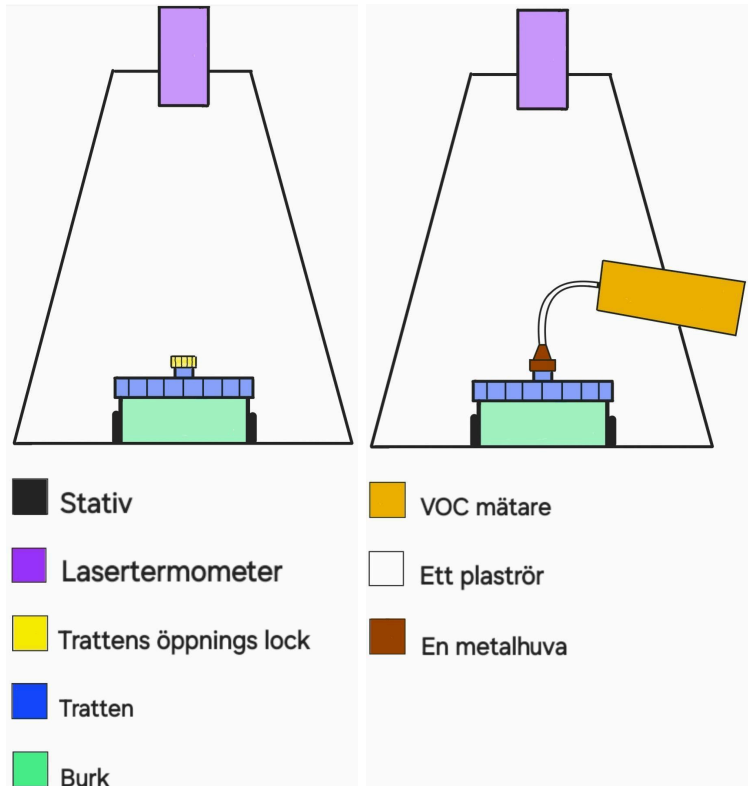
Utifrån resultaten från experimentet har en metod för att mäta VOC-emissioner från bitumen utvecklats som tar hänsyn till parametrar såsom luftvolymen i burken, trattens storlek och val av termometer. Metoden är optimerad för att säkerställa att VOC och temperatur bibehålls under mätningen och att resultaten blir så tillförlitliga som möjligt.

Burkens storlek spelar ingen roll så länge bitumandelen i förhållande till luftvolymen i burken ska motsvara cirka 27%. Denna andel visade sig generera mest VOC-halter som observeras i delexperiment B och C. En metalltratt, anpassad till burkens storlek och som kan skruvas fast på burken som ett lock, har tagits fram. Tratten har dessutom ett lock på sin öppning. Detta tillägg säkerställer att VOC och temperatur bevaras utan att tratten behöver röras under mätningen, vilket

annars skulle kunna leda till förlust av både VOC-halter och temperatur samt inblandning av kall luft med VOC-emissionerna.

För temperaturmätningen används en lasertermometer monterad på ett stativ för att säkerställa en stabil och korrekt mätning från ett visst avstånd utan fysisk kontakt med bitumenet. Bitumenprovet i burken ska placeras på en metallhållare som är ansluten till stativet. Syftet med metallhållaren är att metallburken ska vara placerad på rätt ställe (då lasertermometern är exakt över trattens öppning) så att lasertermometern kan läsa temperaturen repeterbart. Det är viktigt att locket på trattens öppning är tillräckligt liten för att minimera värmeförlust men samtidigt tillräckligt stor för att lasertermometern ska kunna mäta temperaturen. Denna metod förhindrar snabb avsvälning och förlust av VOC-halter.

VOC-mätningen utförs genom att ett plaströr som kopplas från ena sidan av VOC-instrumentet och andra sidan till trattens öppning med hjälp av en metallhuva som sitter på trattens öppning. Metallhuvan ska vara anpassad efter trattens öppningsmått för att sitta tätt och förhindra att VOC-emissioner läcker ut. Det förväntas att den utvecklade metoden ska bidra till mer pålitliga och konsistenta mätresultat genom att minimera förluster och inblandning av yttre faktorer. Figur 28 nedan visar en illustration på hur den nya mätmetoden hade sett ut.



Figur 28. En illustration över hur den utvecklade metoden bör se ut.

5 Slutsatser och rekommendationer

5.1 Slutsatser

Utifrån studiens resultat dras följande slutsatser:

- Valet av mätinstrument för temperatur påverkar mätnoggrannheten och tiden för mätningen.
- En mindre trattstorlek verkar mer fördelaktig för VOC-insamling för mätning än en större tratt.
- Bitumenvolymen i förhållande till luftvolymen i burken påverkar VOC-haltens utsläpp.
- En större bitumenmassa bidrar till långsammare avsvälning.
- Mer bitumenmassa resulterar till lägre VOC-halt.
- Det finns en tydlig koppling mellan avsvälningen av bitumen och VOC-emissionerna där en minskande temperatur medför minskade VOC-emissioner. Detta gäller för samtliga undersökta bitumentyper och mätkombinationer.
- Val av bitumentyp spelar roll för hur mycket VOC-halter som släpps ut under uppvärmningen, där hårdare bitumen genererar mindre VOC-halter jämfört med mjukare bitumen.

5.2 Rekommendationer för fortsatt metodutveckling

Den nya mätmetoden som utvecklats är baserad på kritiska parametrar från experimenten. För att ytterligare förbättra metoden föreslås utforskning av fler

temperaturområden samt tester av olika bitumenkällor och bitumentyper. Dessa åtgärder syftar till att uppnå mer exakta värden jämfört med de som uppnåddes under detta experiment. Dessutom är det viktigt att undersöka hur den nya metoden hanterar höga VOC-halter. Höga VOC-koncentrationer kan leda till övertryck som kan vara farligt vid öppnandet av burken.

Det är även viktigt att det optimala avståndet för en lasertermometer bestäms för att undvika tidsslöseri och snabb avsvälning samt förlust av VOC-halter. Vidare bör tratten undersökas noggrant för att optimera effektiviteten i temperaturmätningen. Öppningen bör vara tillräckligt stor för att tillåta noggranna mätningar men tillräckligt liten för att minimera risken att VOC-emissioner läcker ut under mätprocessen.

För att vidareutveckla metoden bör repetition av tester genomföras under olika experimentella förhållanden. Dessutom bör mätningarna kopplas till mer avancerade analysmetoder som kan skilja mellan olika typer av VOC och kvantifiera enskilda föreningar, vilket kan vara särskilt intressant från ett miljö- och hälsoperspektiv.

Referenser

Agardh, S. & Parhamifar, E. (2014). Vägbyggnad. Stockholm: Liber AB.

American Lung Association (2024). Volatile Organic Compounds.

<https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds#:~:text=Breathing%20VOCs%20can%20irritate%20the,Some%20VOCs%20can%20cause%20cance.>

[Hämtad: 2024-05-21]

Altarmazwi, A . & Badran, M. (2022). Undersökning av lågtemperaturregenskaper hos bitumen för asfaltbeläggningar med dynamisk skjuvremometer. Examensarbete civilingenjörsexam. Lund: Lund universitet.

<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=9088952&fileOId=9089066>

Autelitano, F., Bianchi, F. & Giuliani, F. (2017). Airborne emissions of asphalt/wax blends for warm mix asphalt production. Journal of Cleaner Production.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.247>

Arbetsmiljöverket (2022). Hygieniska gränsvärden. Solna: Arbetsmiljöverket.

<https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/hygieniska-gransvard-en-afs-2018-1.pdf>

Asfaltboken (u.å). Kapitel 5 Bindemedel. <https://asfaltboken.se/bindemedel/>

[Hämtad: 2024-04-10]

Asfaltgruppen (u.å). Vår asfaltstillverkning. <https://asfaltsgruppen.se/om-asfalt/> [Hämtad: 2024-04-03]

Asfaltskolan (2020). Asfaltteknik. <https://asfaltskolan.se/asfaltteknik/> [Hämtad: 2024-04-03]

Björkman, J (2009). Utsläpp av Flyktiga Organiska Föreningar och Partiklar i Falun. Examensarbete magisterexamen. Umeå: Umeå universitet.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:344162/FULLTEXT01>

Chen, S., Wang, J., Li, Q., Zhang, W & Yan, C (2022). The Investigation of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in Environmentally Friendly Modified Asphalt. Journal of polymer science.
<https://doi.org/10.3390/polym14173459>

Eurofins (u.å). Bedömningsunderlag för VOC-analys. Uppsala: Pegasuslab AB
<https://www.eurofins.se/dokument/analysrapporter/bedomningsunderlag-kemisk-m-voc-voc-eurofins-pegasuslab.pdf>

Granhage, L (2009). Kompendium i vägbyggnad. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1452855/FULLTEXT02.pdf>

ION Science (u.å). TIGER XT: Pioneering Gas Sensing Technology. [broschyr].
<https://intrinsicallysafestore.com/wp-content/uploads/Tiger-XT-brochure-V1.0-USA.pdf>

ITM (2001). Cancerframkallande ämnen –Olika källors betydelse för spridningen och förekomsten i Stockholm. Rapport 90. Institutet för Tillämpad Miljöforskning (ITM).

https://www.slbanalys.se/slb/rapporter/pdf8/itm2001_090.pdf

Janhäll, S., Strandberg, B., Wallqvist, V & Rissler, J. (2024). A new method and first results for comparing emissions of fumes during construction of asphalt surfaces. Construction and Building Materials.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824008778?via%3Dihub>

Kemikalieinspektionen (2015). Hälsoskadliga kemiska ämnen i byggprodukter– förslag till nationella regler. Rapport 8/15. Stockholm: Arkitektkopia AB.

https://www.regeringen.se/contentassets/8464c1362f2b4892a45bd55edfada341/151202-kemi-rapport-8-15-halsoskadliga-kemiska-amnen-i-byggprodukter_-forslag-till-nationella-regler.pdf

Li, T., Lu, G., Lin, J., Liang, D., Hong, B., Luo, S., Wang, D & Oeser, M (2022). Volatile organic compounds (VOCs) inhibition and energy consumption reduction mechanisms of using isocyanate additive in bitumen chemical modification.

Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133070>

Liu, G., Fang, S., Wang, Y., Liu, J., Liang, Y. & Cao, T. (2023). Emission of Volatile Organic Compounds in Crumb Rubber Modified Bitumen and Its Inhibition by Using Montmorillonite Nanoclay. Journal of polymer science.

<https://doi.org/10.3390/polym15061513>

Mortazavi, M. & Moulthrop, J.-S. (1993). The SHRP Materials Reference Library. The University of Texas at Austin. Washington, DC: The University of Texas at Austin. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-a-646.pdf>

Naturvårverket (2007). Flyktiga organiska ämnen (VOC). Stockholm: CM Gruppen AB.
<https://www.naturvardsverket.se/4ac2bf/globalassets/media/publikationer-pdf/0100/978-91-620-0145-2.pdf>

NVF (2000). Asfaltens gröna bok. Rapport 2/2000. Nordiska vägförbundet (NVF).
[https://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Asfaltens_Grona_Bok/\\$file/Asfaltens%20Gr%C3%B6na%20Bok.pdf](https://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Asfaltens_Grona_Bok/$file/Asfaltens%20Gr%C3%B6na%20Bok.pdf)

Robertus, C., Thimm, L. & Hossain, S. (2016). PAH`s in bitumen: many paths - one destination. Gelsenkirchen, Tyskland
<https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1090>

Väghållningens juridik (2018). Sveriges Kommuner och Landsting. Stockholm: Åtta.45 Tryckeri AB.
<https://skr.se/download/18.7c1c4ddb17e3d28cf9b61893/1642600979418/7585-700-8.pdf>

Wang, Y., Mo, S., Xiong, F & Ai, C. (2019). Effects of asphalt source and mixing temperature on the generated asphalt fumes. Journal of Hazardous Materials.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.025>

Wang, Y., Chong, D., Guo, H. & Lu, Y. (2013). Volatile Organic Compounds Generated in Asphalt Pavement Construction and Their Health Effects on Workers. *Journal of Construction Engineering and Management*.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000801](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000801)

Yang, X., Wang, G., Rong, H., Meng, Y., Liu, X., Liu, Y. & Peng, C. (2022). Review of fume-generation mechanism, test methods, and fume suppressants of asphalt materials. *Journal of Cleaner Production*.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131240>