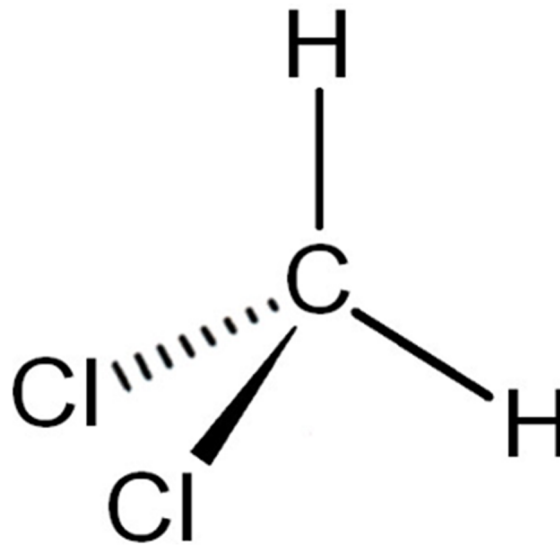


PROJEKTNR. 14126

ERSÄTTNING AV METYLENKLORID VID ASFALTSEXTRAKTIONER

Förstudie



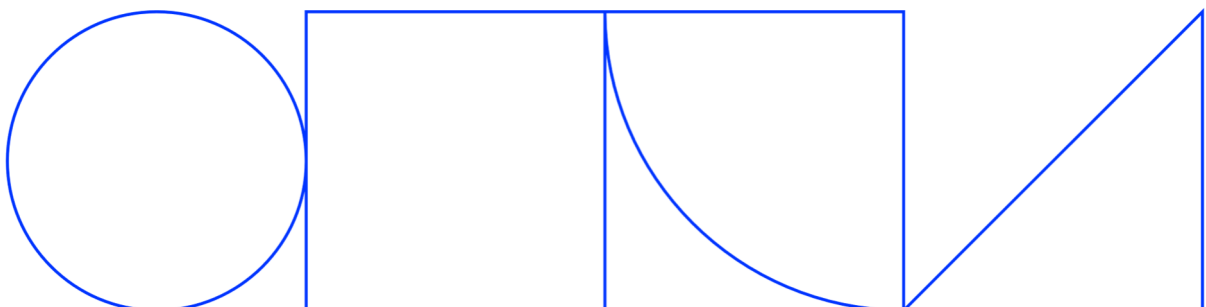
Katarina Ekblad
Skanska Sverige AB

Jiqing Zhu
Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI

Petru Niga
RISE, Research Institutes of Sweden AB

Mehrnaz Shaali
RISE, Research Institutes of Sweden AB

2023-11-15



Förord

Denna förstudie har utförts under januari till november 2023.
Förstudien har finansierats av SBUF, Trafikverket, VTI och Nynas.

Arbetsgruppen har bestått av:

Katarina Ekblad, Skanska Sverige AB, Projektledare mot SBUF,
Jiqing Zhu, VTI, Projektledare mot Trafikverket,
Petru Niga, RISE och
Mehrnaz Shaali, RISE som ersatte Narges Naseri, RISE våren 2023.

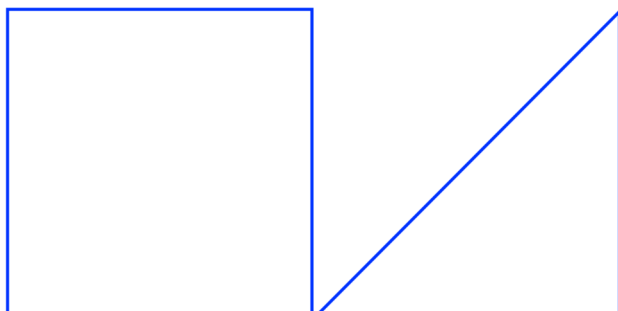
Projektets styr- och referensgrupp, innefattar även:

Khalid Kader, NCC Industry AB
Michael Langfjell, Peab Asfalt AB
Xiaohu Lu, Nynäs
Henrik Arnedal, Trafikverket
Björn Kalman, VTI
Andreas Waldemarsson, VTI
Kenneth Lind, Trafikverket

Vi vill speciellt tacka SBUF, Trafikverket, VTI och Nynas som är våra finansiärer, som gjort det möjligt att utföra denna förstudie samt övriga medlemmar i styr- och referensgruppen, för bra tips och utvecklande samarbete.

Katarina Ekblad

Malmö 2023-11-10



Sammanfattning

I Trafikverkets kravdokument för leveranskontroll av asfaltmassa, ställs krav på bland annat provning av bindemedelshalt och bindemedlets egenskaper. För denna provning krävs att asfaltmassan löses upp med ett lösningsmedel, oftast metylenklorid. Metylenklorid är ett halogenerat lösningsmedel, som effektivt löser bituminet i asfaltmassan men som vid exponering kan orsaka yrsel, illamående, domningar och det finns även misstankar att det kan orsaka cancer, mutation och fosterskador.

Denna förstudie syftar till att undersöka möjligheten att ersätta metylenklorid, med lösningsmedel som är bättre att använda för laboratoriepersonal och miljö.

Litteratur från flertalet utvecklingsprojekt och vetenskapliga artiklar på undersökningar, som utförts för att ersätta befintliga lösningsmedel och extraktionsmetoder, har studerats. Flera undersökningar, visar att det är möjligt att extrahera bindemedel från asfaltmaterial, med andra lösningsmedel än klorerade organiska lösningsmedel.

Extraktion av asfalt med olika bindemedelstyper, har utförts med rapsmetylester, RME och metyloktanoat, OME. Båda lösningsmedlen gav bra överensstämmelse av bindemedels- och fillerhalt, med annan extraktionsmetod. Vid försöken med RME krävdes en efterföljande tvätt med en tensid, för att få ett rent stenmaterial. En del av extraktionsåterstoden behövde destrueras. Vid försöken med OME kunde extraktionerna och återanvändning av lösningsmedlet utföras i en asfaltanalysator. Däremot fanns lösningsmedel kvar i bindemedlet, så att efterföljande analyser inte blev korrekta.

Bindemedelshalten i asfalt kan även analyserats med helt lösningsmedelsfria metoder som förbränningsmetoden eller genom beräkning. Dessa metoder fungerar enbart för bestämning av bindemedelshalt, om korndensitet och korrektionsfaktor för stenmaterialet är kända.

Lämpliga egenskaper på alternativa lösningsmedel har undersökts.

Kemikalier som är farliga för djur och växter är svåra att bryta ner i naturen och kan finns kvar länge. Med risk för ett eventuellt utsläpp bör alternativa lösningsmedel inte vara farliga för miljön.

Kemikalier eller blandningar av flera kemiska ämnen, kan vara hälsofarliga vid exponering. Symptom vid exponering genom hudkontakt och inandning kan vara illamående, yrsel och medvetlöshet. Flera klorerade lösningsmedel är också cancerframkallande. Kemikalier kan även vara brandfarliga, orsaka explosion eller minska halten syrgas i luften. Alternativa lösningsmedel bör inte vara hälsofarliga.

Ett alternativt lösningsmedel bör kunna lösa samtliga bindemedel som används i asfaltmaterial idag och i framtiden, samt tillsatsmedel till exempel vidhäftningsmedel. I den litteratur som har studerats, har flera olika undersökningar på lösligheten av bindemedel gjorts och det kan konstateras att lösningsmedel som innehåller kloratomer och organiska lösningsmedlen, löser bindemedlen i asfaltmaterialen bäst.

Alternativa lösningsmedel bör vara lättåtkomliga, med snabba leveranser, för att laboratorierna inte ska tvingas ha lösningsmedel på lager.

Ur ett ekonomiskt perspektiv bör hänsyn tas till ersättningslösningsmedlets inköpspris, hur stor mängd lösningsmedel som förbrukas per prov, hur stor andel av lösningsmedlet, som går att återvinna och om någon del av extraktionsåterstoden behöver destrueras. Vid byte av lösningsmedel, får även eventuellt ny extraktions- och återvinningsutrustning köpas in.

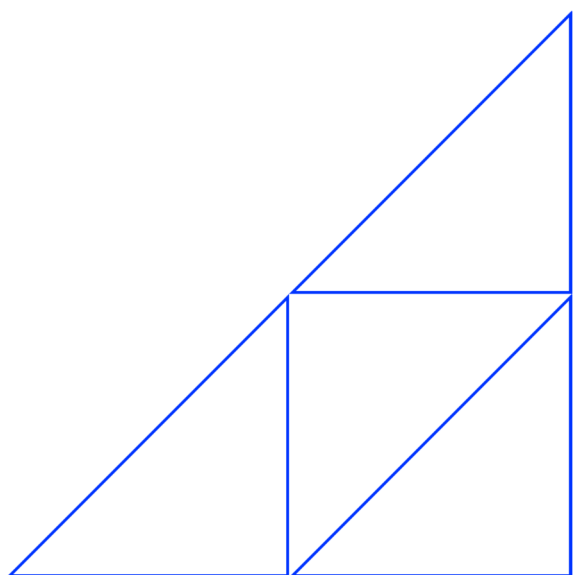
Den prioriteringsordningen på egenskaperna som styr- och referensgruppen tagit fram är följande: Arbetsmiljö, Miljö, Upplösande egenskaper, Tillgänglighet och Ekonomi.

I studien av alternativa upplösningmetoder har Hansens löslighetsparametrar, (Hansens Solubility parameters, HSP,) varit mest intressant. Genom HSP går det att få ut lämpliga lösningsmedel, både traditionella, miljö- och arbetsmiljövänliga alternativ. Om inga lämpliga lösningsmedel finns, kan förslag på blandningar av 2 eller flera lösningsmedel ges. Ytterligare användning är att få förslag på lösningsmedel som effektivt löser asfalten i ett första steg och sedan i det andra steget tillsätts ett annat lösningsmedel, som fäller ut det första lösningsmedlet. Denna metod kan förenkla återvinningsprocessen.

Superkritisk koldioxid (scCO₂) är ett tillstånd av koldioxid som uppnås genom att utsätta koldioxiden för högt tryck och temperatur. I detta tillstånd beter sig koldioxiden som en gas, samtidigt som den bibehåller en densitet som liknar den för en vätska. ScCO₂ har hög löslighetsförmåga, låg giftighet och är inte brandfarlig.

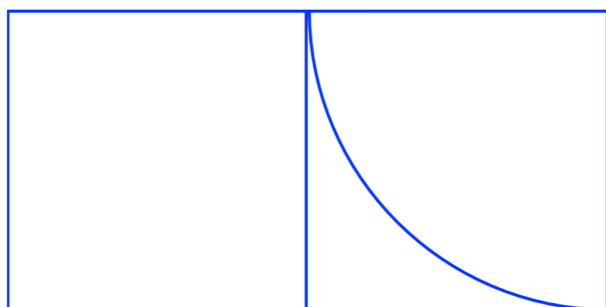
Joniska vätskor, (ionic liquids, IL,) är också potentiella lösningsmedel för olika tillämpningar. Fördelarna med joniska vätskor är många, de är flytande vid rumstemperatur, luktfria, ej brandfarliga och har hög lösningsförmåga. Nackdelarna med joniska vätskor är att de är dyra, svårtillgängliga och kan vara giftiga.

Förstudien kan sammanfattas med att det finns många lämpliga alternativ på lösningsmedel eller blandningar och fler kan föreslås med HSP-programmet. Det finns även flera olika tekniska upplösningmetoder, som kan vara användbara för att lösa asfaltmaterial med. Så det finns stora möjligheterna att hitta alternativa lösningsmedel och metoder, för att ersätta metylenklorid.



Innehåll

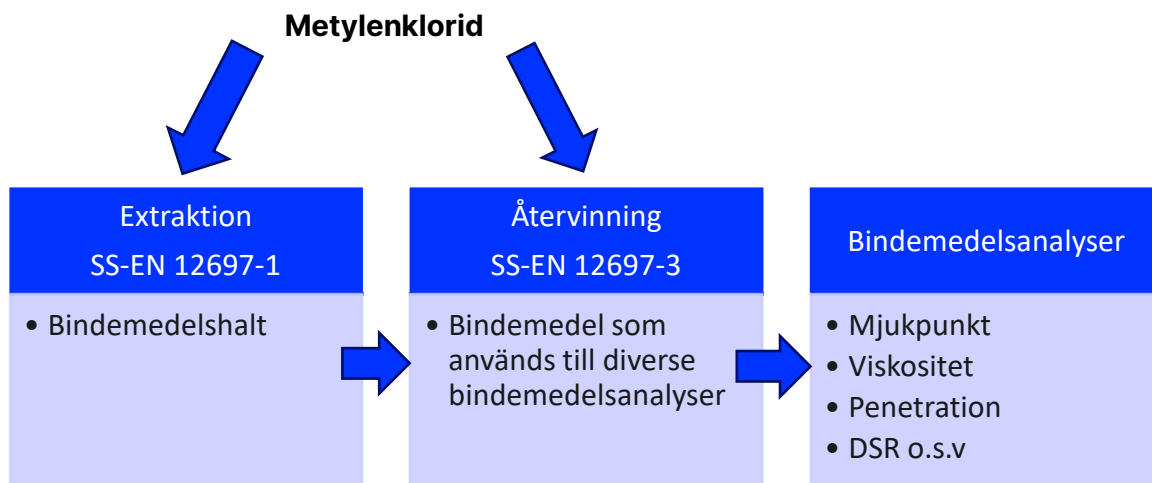
1. Bakgrund.....	5
2. Syfte	7
3. Genomförande.....	7
4. Litteraturstudier.....	7
4.1. Undersökningar gjorda i Sverige.....	8
4.2. Undersökning gjord i Tyskland	11
4.3. Alternativa metoder utan lösningsmedel	13
4.4. Övriga vetenskapliga artiklar	15
4.5. Sammanfattning av relevanta erfarenheter från litteraturstudierna.....	17
5. Lämpliga egenskaper för lösningsmedlet	18
5.1 Lösningsmedel som används idag.....	18
5.2 De viktigaste egenskaperna	19
5.3 Egenskapernas prioriteringsordning	25
6. Tekniska metoder för val av alternativa lösningsmedel och upplösning av dem...	26
6.1 Möjliga lösningsmedel.....	26
6.3 2-steg med 2 olika lösningsmedel.....	28
6.4 Superkritisk koldioxid, scCO ₂	28
6.5 Joniska vätskor, IL	28
7. Slutsatser	29
Litteraturlista.....	32



1. Bakgrund

Vid utförande av beläggningsarbeten på vägar, ställs det krav på levererad asfaltprodukt och ingående material. Dessa krav finns, beskrivna i Trafikverkets kravdokument; ¹Bitumenbundna lager, TDOK 2013:0529. Här ställs bland annat krav på analys av bindemedelshalt enligt provningsmetod ²SS-EN 12697-1, Vägmaterial - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 1: Löslig bindemedelshalt och analys av mjukpunkt och viskositet, på återvunnet bitumen som återvinns enligt provningsmetod ³SS-EN 12697-3, Vägmaterial - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 3: Återvinning av bindemedel: Rotationsindunstare.

I båda dessa provningsmetoder, löses bindemedlet i asfalten, bituminet, med hjälp av ett lösningsmedel. Det lösningsmedel som de flesta asfaltslaboratorier använder i Sverige, är metylenklorid, se figur 1. Metylenklorid eller diklormetan, som är ett annat namn för samma lösningsmedel, är ett halogenerat organiskt lösningsmedel, som effektivt löser fett, vax och harts. Metylenklorid har använts i en mängd olika tillämpningar såsom avfettning, rengöring och färgborttagare men även i lim, lack, gängpasta och rostskyddsmedel. Trikloretylen är ett annat halogenerat organiskt lösningsmedel, som också används vid extraktion av bitumen, vanligtvis i Tyskland.



Figur 1. Metylenkloridens användningsområden, på asfaltslaboratorier i Sverige

Fördelen med att använda metylenklorid för upplösning av bituminösa asfaltprodukter, är att metylenklorid har låg kokpunkt på ca 40 °C, i jämförelse med andra lösningsmedel till exempel trikloretylen, som har kokpunkt på ca 87 °C. Det gör det enkelt och snabbt att dunsta bort metylenklorid, från kvarvarande stenmaterial vid extraktion samt att återvinna lösningsmedlet och använda igen.

Å andra sidan kan exponering av metylenklorid leda till hälsorisker som yrsel, trötthet, illamående, huvudvärk och domningar, blodstörtning och det finns även misstankar om cancer, mutation och fosterskador. Dessutom har metylenklorid skadliga långtidseffekter för vattenlevande organismer och bör därför inte släppas ut i miljön och vatten.

I Sverige finns en förordning; ⁴SFS 1998:944, Förordning (1998:944) om förbud m.m. i vissa fall i samband med hantering, införsel och utförsel av kemiska produkter, som förbjuder att kemiska produkter som helt eller delvis består av metylenklorid, saluhålls, överlåts eller används, både yrkesmässigt och för enskilt bruk.

Ett undantag från förbudet framgår av ⁵Kemikalieinspektionens föreskrift (KIFS 2017:7) om kemiska produkter och biotekniska organismer, 5 kap. 3§ och 4§, där kemiska produkter som helt eller delvis består av metylenklorid får överlåtas och användas yrkesmässigt vid forskning och utveckling samt i analysarbete.

De flesta asfaltlaboratorier använder idag asfaltanalysatorer från infraTest Prüftechnik GmbH, se bild 1, vid extrahering av asfaltmaterial. Asfaltanalysatorerna extraherar och återvinner lösningsmedlet i ett slutet system och minskar därför exponeringen av metylenklorid avsevärt för laboratoriepersonalen, jämfört med likvärdiga analysmetoder. Men att det finns risker för spill, läckage och exponering i samband med påfyllning av metylenklorid i asfaltanalysatorn, tömning av destillationsrester och byte av metylenkloridfätsfat, går inte att utesluta.

Vi vet inte hur länge metylenklorid, kommer få användas i analysarbete i Sverige. Innan Kemikalieinspektionens undantag tas bort, hade det varit bra om vi hittat en ersättare till metylenklorid, med samma upplösande egenskaper på asfaltmaterial.



Bild 1. Asfaltanalysator med extraktions- och återvinningsenhet på Skanskas laboratorium i Gunnilse, från infraTest Prüftechnik GmbH.

2. Syfte

Denna förstudie syftar till att undersöka möjligheten att ersätta metylenklorid med ett eller flera, ur miljö- och arbetsmiljöperspektiv bättre lösningsmedel, som kan användas till extraktion och återvinning av bindemedel från asfalt.

Skulle det gå att ersätta metylenklorid med ett bättre lösningsmedel, kan samtliga laboratorier i branschen börja driva sina verksamheter på ett mer miljövänligt sätt och erhålla en säkrare arbetsmiljö.

Dessutom skulle branschen vara förberedd när Kemikalieinspektionens nuvarande undantag, som tillåter användning vid analysarbete, tas bort.

3. Genomförande

Denna förstudie har innefattat följande delar:

- Litteraturstudier av tidigare undersökningar, som gjorts för att ersätta halogenerade organiska lösningsmedel, dels i utvecklingsprojekt, dels i vetenskapliga artiklar.
- Sammanställning av relevanta erfarenheter från litteraturstudierna.
- Sammanställt lämpliga egenskaper på ersättningslösningsmedel inom miljö-, arbetsmiljö-, löslighet-, tillgänglighet- och ekonomiperspektiv samt några fysikaliska och kemiska egenskaper.
- Bestämt prioriteringsordningen på dessa egenskaper.
- Sammanställt några alternativa lösningsmedel och deras egenskaper.
- Studerat olika alternativa upplösningsmetoder.
- Sammanfattat möjligheterna att ersätta metylenklorid.

4. Litteraturstudier

Vi har studerat några tidigare undersökningar, som gjorts för att ersätta halogenerade organiska lösningsmedel i asfaltbranschen dels i Sverige, dels i Tyskland samt ett föredrag som Matthias Martus på infraTest Prüftechnik GmbH, som tillverkar asfaltanalyser, höll på Metoddagen 2022. Vi har även studerat vetenskapliga artiklar om ämnet.

4.1. Undersökningar gjorda i Sverige

I början av 2000-talet utfördes ett par SBUF-projekt med mål att kunna ersätta metylenklorid vid extraktion av asfalt.

°SBUF-projekt nr 9103, **Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, del 1**, från 2001, leddes av Thomas Karlsson på Skanska. Projektet konstaterade att metylenklorid eller 1,1-diklormetan, har länge använts på asfaltslaboratorier för bestämning av bindemedelshalt, återvinning av bindemedel för vidare analys eller rengöringsändamål.

Fördelarna med metylenklorid är att det föreskrivs i metoderna ovan, löser bitumen snabbt och bra, har låg kokpunkt, lätt att destillera bort och saknar flampunkt vilket gör att explosionsskyddad utrustning inte är nödvändigt. Xylen kan användas men är brandfarligt och har hög kokpunkt. Detsamma gäller för toluen och koldisulfid.

Nackdelen med metylenklorid är svårigheten att säkerställa god arbetsmiljö. Metylenklorid är misstänkt cancerogen och påverkar även den yttre miljön.

Industrier som verkstadsindustrin, har gjort utredningar avseende alternativ för avfettningssändamål. Men att ersätta lösningsmedel med en kemisk produkt som med tiden innebär andra hälso- och miljörisker, bör undvikas. Nya kemiska produkter är sällan fullständigt utvärderade, utan hälsorisker kan med tiden upptäckas. Det beror på hur kemikalierna absorberas och metaboliseras i kroppen. Därför är ett byte till nya kemiska produkter komplicerat.

Lösningsmedel är generellt tveksamma ur arbetsmiljösynpunkt, eftersom de för det mesta har negativa effekter på organismer. Miljöbalken säger att farliga kemikalier ska ersättas med mindre farliga eller elimineras, där det är tekniskt möjligt.

Bindemedelshalt i asfalt kan bestämmas utan extraktion, genom förbränning. Denna teknik eliminerar användningen av lösningsmedel och analyser har visat att utsläppen är acceptabla. Tyvärr fungerar inte förbränningsmetoden så bra på stenmaterial med stor variation, eftersom ojämn halt av kemiskt bundet kristallvatten, ger för stor variation i vikt förlusten.

Funktionell provning börjar långsamt introduceras, för att ersätta leveranskontrollen på vägen men de har inte ersatt de gamla provningstyperna som till exempel bindemedelshalt, som inte mäter produktens funktion, utan bestäms för att kontrollera att tillverkningens produktspecifikation följs.

Bindemedelshalten behöver kanske inte bestämmas genom en direkt analys, utan av en sönderfallsprodukt. Vilket faktiskt många av våra metoder för att bestämma bindemedelshalten är.

Spektrofotometri är en analysmetod, som baseras på hur ett ämne absorberar elektromagnetisk strålning, av en viss våglängd. En spektrofotometer mäter hur stor del av strålningens intensitet som tar sig igenom en provlösning. Mängden strålning som absorberas är ett mått på koncentrationen av ämnet. Mätningen jämförs med rent lösningsmedel.

Spektrofotometrar finns med olika våglängdsområden, UV-ljus, Synligt ljus eller IR-ljus. Eftersom dessa områden spänner över breda våglängdsintervall behövs en utrustning som filtrerar önskad våglängd. Ljuskällan går igenom filtret, in i en kyvett med lösning av bitumen och lösningsmedel och in i en detektor. I kyvetten absorberas ljuset till viss del av lösningen. Ställs våglängden in rätt absorberas ljuset enbart av bitumenmolekylerna.

I projektet gjordes försök med asfaltmassa som löstes upp i olika lösningsmedel, som alla anses mindre miljö- och hälsofarliga än metylenklorid och andra halogena och organiska lösningsmedel. Blandningarna av asfaltmassa och lösningsmedel, fick spädas ut till 0,5% bindemedel, för att slippa total ljusabsorption. Olika bitumensorter får olika absorption i spektrofotometern men vid jämförelse med referenslösning gjord på samma bitumensort, erhöles bra överensstämmelse mellan spektrofotometri och pipettmetoden.

RME, rapsmetylester, har en extremt hög kokpunkt vilket gör det omöjligt att extrahera bort lösningsmedlet. Men RME löser bitumenprodukter mycket bra och har låg risk för explosion. Vid försöken med spektrofotometri erhöles goda resultat vid bestämning av bindemedelshalten. Även försök med 2-etylhexylkokoat gjordes men utfällningar uppstod inom 24 timmar, vilket försvårade utvärderingen.

Upplösningsförsök gjordes i projektet med olika lösningsmedel, som alla anses mindre miljö- och hälsofarliga än metylenklorid och andra halogena och organiska lösningsmedel. 200 g asfaltmassa och 0,5 liter lösningsmedel hölls i en bägare. Okulär bedömning gjordes efter 1 h, 4 h, 8 h, 3 dygn och 1 vecka vid rumstemperatur, av upplösningen. Metylkokoat, 2-etylhexylkokoat och RME löser bitumenprodukter mycket bra. NMP (n-metyl-2-pyrrolidone), Methylal löser bitumenprodukter bra. Övriga testade lösningsmedel, Dioxolane, Santosol och Dowanol PM, löser inte bitumenprodukter alls eller dåligt, vid rumstemperatur.

⁷SBUF-projekt nr 11038, **Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, del 2**, från 2002, leddes också av Thomas Karlsson på Skanska.

RME visade sig i del 1, lösa bitumenprodukter mycket bra. RME tillverkas från rapsolja, som pressats ur rapsfrön, och enkelt förklarar kokats med metanol och lut. Ju renare RME'n är ju ljusare är färgen, från nästan färglös till gul. Lukten av RME är mycket svag och RME klassas inte som farlig eller farligt avfall. RME anses inte som allergiframkallande. RME har en mild irriterande och uttorkande effekt av huden, p.g.a. sina fettlösande egenskaper. RME har låg akuttoxisk effekt gentemot vattenorganismer, bryts lätt ner och nedbrytningsprodukterna är inte heller giftiga. Eftersom RME innehåller långa kolkedjor har den en hög kokpunkt, som innebär att den inte går att extrahera bort, som metylenklorid gör.

Vid extraktion av asfalt med RME, är det en fördel att höja temperaturen något till ca 60–70 °C. Väg in provet i plåt- eller polypropenburk (polyeten påverkas av RME). Ultraljud påskyndar troligtvis upplösningen. Omrörning i burken kan ske manuellt eller med elektrisk omrörare. Extraktionen kan även automatiseras med befintliga metoder, men återvinningsutrustningen i asfaltanalysatorn fungerar inte på grund av den höga kokpunkten och kommer kräva hög förbrukning av lösningsmedel.

Differensmetoden innebär att bindemedelsvikten beräknas genom att minska asfaltmassans vikt med sten- och fillermaterialens vikter.

Bestämning av bindemedelshalten genom mätning med spektrofotometer visade sig i del 1 fungera men differensmetoden kan lika gärna användas. Däremot kan metoden med spektrofotometer visa om 2 bitumenprover är identiska eller ej, eftersom varje bitumen har olika absorptionsbeteenden.

Bestämning av bindemedelshalten genom mätning av densiteten, innebär att bindemedelsmängden kan beräknas genom bestämning av densiteten på en lösning av RME och bitumen, genom att veta densiteten på RME och densiteten på bituminet.

Bestämning av bindemedelshalten med RME, genom differensmetoden, är lite annorlunda än med konventionella lösningsmedel. För att få bort RME från sten- och fillermaterial, behöver tvättas med tensidlösning.

Den tensid som använts i dessa försök heter natriumlauryletsulfat, NLES. NLES ingår i hårschampo och tvättmedel, är inte klassad som farlig men kan vara irriterande för hud och ögon. NLES är primärt giftig för vattenorganismer men är lätt nedbrytbar, så den klassas inte som giftig.

För att minska risken för skillnader i jämförande metoder, har bindemedel och stenmaterial vägts in, i proverna. 4 massasorter och 6 prover av varje sort har körts dels med RME, dels med Metylenklorid. Resultaten nedan visar mycket små variationer mellan invägda mängder och extraherade mängder, både på extraktion med RME och Metylenklorid:

ABT 8 160/220 ger skillnad mellan +0,05 och -0,04 från invägd mängd, på RME och +0,02 och -0,03 på Metylenklorid.

ABT 16 160/220 ger skillnad mellan +0,03 och -0,02 från invägd mängd, på RME och +0,03 och -0,05 på Metylenklorid.

ABS 16 70/100 ger skillnad mellan +0,02 och -0,04 från invägd mängd, på RME och +0,02 och -0,02 på Metylenklorid.

AG 22 160/22 0 ger skillnad mellan +0,03 och -0,05 från invägd mängd, på både RME och Metylenklorid.

Även kornstorleksfördelningarna har mycket små variationer, på samtliga prover.

Hänsyn får tas till hur RME-blandningen destrueras, innan byte av lösningsmedel sker. I projektet kunde RME/bitumen-blandningen dekanteras från vatten/tensid-blandningen. Den första fraktionen kostade då ca 3 kr/analys medan den andra fraktionen består till 95% vatten och borde kunna släppas ut i avloppet. Men då bör innehållet analyseras först.

Återigen frågar sig författaren om vitsen att analysera ett bindemedelsprov på ca 2 kg som ska representera 800 ton, vilket motsvarar 0,003 promille. Idag kan provet representera upp till 2000 ton, 0,001 promille.

4.2. Undersökning gjord i Tyskland

I januari 2018 publicerade Bundesanstalt für Strassenwesen i Tyskland, en projektrapport: **Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)**, av Alexander Alisov och Michael P. Wistuba Tekniska universitetet i Braunschweig, Institutet för vägvvetenskap (ISBS).

I Tyskland kommer användning av trikloretylen (Tri, även kallad trikloreten), som är det lösningsmedel som används för extraktion av asfaltmassa i Tyskland, att förbjudas i framtiden. Det kommande förbudet och krav på substitution, vilket innebär att farliga kemiska ämnen tas bort eller byts ut mot mindre farliga, innebär att lämpliga lösningsmedel behöver hittas. Detta forskningsprojekt har undersökt möjligheten att byta ut Tri mot metyloktanoat (OME).

OME är en till synes oskadlig bitumenlösande ester, som är gjord av organisk olja med en kokpunkt på ca 193 °C, en fryspunkt på cirka -40 °C och en karakteristisk lukt av kokosnöt (därför kallas den kokosester). Lukten upplevs som irriterande även i små koncentrationer och är svår att bli av med. Projektet rekommenderar användning av andningsskydd vid de mest utsatta momenten i analysen. OME är även irriterande för hud, ögon och magtarmkanalen. Den har en flampunkt på ca 245 °C och lösningsmedelsångor över denna temperatur, är mycket brandfarliga vid kontakt med syre. Därför måste temperaturer över 200 °C undvikas i laboratoriet, vilket innebär att varmextraktion med OME som lösningsmedel, inte bör utföras.

Det är dock möjligt att extrahera asfaltmassa och återvinna bindemedlet, i ett slutet system med undertryck, som minskar kokpunkten.

I projektet genomfördes analyser på flera olika asfaltmassor, innehållande flera olika bindemedel, både med och utan polymerer. Inga asfaltmassor innehöll asfaltgranulat. Antalet prover är för lågt för att få statistiskt tillförlitliga resultat men ändå en början för att kunna bedöma om metoden fungerar.

Extraktioner utfördes på de olika asfaltmassorna, både med OME, som lösningsmedel och med Tri. Jämförelser av resultaten på bindemedelshalt och fillerhalt, visade nästintill identiska resultat mellan de två lösningsmedlen.

Efter bindemedelsextraktionen separerades lösningsmedlet från bituminet i en rotationsindunstare. Denna process optimerades, så mycket som möjligt, för de utrustningar som normalt finns på asfaltlaboratorierna. Dock separerades inte allt lösningsmedel från bitumenfasen, utan det fanns fortfarande lösningsmedelsrester kvar i bituminet. Dessa rester påverkar de fysiska egenskaperna hos de återvunna bindemedlen.

Majoriteten av de återvunna bindemedlen är mjukare, i alla undersökta temperaturintervall, efter destillation med OME, än med Tri, vilket indikerar att det finns

lösningsmedel kvar i bituminet. Projektet föreslår vidare utredning av destillationsparametrarna. Detta kan bli en utmaning eftersom den höga kokpunkten för OME (193 °C, i jämförelse med 87 °C för Tri), kan kräva tekniska justeringar av destillationsutrustningen.

Det rekommenderades att arrangera en provningsjämförelse med minst 13 deltagande laboratorier, så fort det finns tillräckligt många optimerade extraktionsutrustningar, som är anpassade för OME.

Lösningssmedlet OME antas vara ofarligt vid hantering, i samband med användning i inbyggda automatiserade extraktionsutrustningar, men detta antagande är inte fullständigt klarlagt. Projektet rekommenderar att utföra kontroll av exponering och ta hjälp av företagshälsovård för att identifiera eventuella arbetsmiljörisker, vid långvarig användning.

I detta projekt har OME kunnat återanvändas, utan väsentliga ändringar av de kemiska egenskaperna. Dock bör det undersökas hur många gånger OME kan återvinnas och vilka parametrar som bör kontrolleras för att säkerställa lösningssmedlets kvalitet.

Matthias Martus, infraTest Prüftechnik GmbH, höll ett digitalt föredrag på Metoddagen 2022, som arrangerades av Metodgruppen i Sverige med titeln **Development testing equipment. How can we remove methylene chloride?**

Föredraget överlappade på flera punkter med projektet från Tekniska universitetet i Braunschweig och flera diagram och resultat framstod som samma.

Lösningssmedlet är i direkt kontakt med stenmaterial, bindemedel, polymerer, vaxer, återvunnet material och andra okända material, vilket kan påverka lösningssmedlet så att pH och alkalinitet ändras. Lösningssmedlet behöver vara 99,5% rent. Är lösningssmedlet förorenat kan dessa föroreningar påverka bindemedlet, ändra kokpunkten och förstöra asfaltanalysatorn.

Martus ansåg att extraktion i ett slutet system i en asfaltanalysator, med indirekt återvinning och ett slutet påfyllnadssystem, är så säkert det kan bli för hälsan och miljön.

Både filler- och bindemedelshalterna har i visat sig, troligtvis i Bundesanstalt für Strassenwessens projekt från 2018, ge samma resultat med OME (metyloktanoate) som med Tri (trikloreten).

Tri har löst 81,8% av bindemedlet, efter 20 min vid 26°C, medan OME har löst 19,4% efter samma tid.

OME kräver ett undertryck på 45–70 mbar, för att ha en rimlig kokpunkt på 100–110°C, vilket Tri har vid 600–850 mbar och 70–80°C.

Tri bildar lätt saltsyra vid närvaro av fukt. Lösningssmedlet påverkas av stenmaterial, bindemedel och polymerer, det åldras, är ostabilt mot UV och värme, reagerar mot vissa metaller, det kan börja rosta i metallbehållare och fungerar då inte vid analys.

Inga asfaltanalyser som finns idag, är explosionsskyddade. De uppskattas bli upp till 150% dyrare.

Lösningsmedel produceras vanligtvis i större mängder, vilket får till följd att små volymer, t.ex. 100 ton per år till asfaltextraktion, blir ointressant för tillverkningsledet.

Hantering av lösningsmedel innebär att återvinning måste ske. Kemikalieleasing kan kanske vara en lösning? *Författarnas anmärkning: Kemikalieleasing är en affärsmodell, där betalning inte görs för mängden lösningsmedel, utan för den funktion som lösningsmedlet gör, till exempel antalet analyser som har utförts.*

Martus slutsatser var: Asfaltextraktion för att undersöka bindemedlets egenskaper, är komplext. Genom användning av slutna system kan extraktioner utföras säkert och exakt, vilket har minskat förbrukningen av lösningsmedel enormt. Utvärderingen för att hitta nya lösningsmedel är komplicerad och det går inte att bara blanda olika lösningsmedel, med varandra. Extraktioner är inte tvättning utan provning. Det är smartare att hantera kända farliga lösningsmedel med modern teknik, än att leta efter nya okända lösningsmedel. Martus sista fråga var: Vad gör vi med dioxiner och furaner, som bildas genom analys i en förbränningsugn?

4.3. Alternativa metoder utan lösningsmedel

¹⁰SBUF-projekt nr 11125, **Lösningsmedelfri metod för att bestämma bindemedelshalt och kornstorleksfördelning, Del A** utfördes 2002 och även detta projekt leddes av Thomas Karlsson på Skanska

Teorin bakom projektet är en formel, där beräkning av bindemedelshalten i asfaltmassa kan göras, genom att veta bitumendensitet, korndensitet och kompaktdensitet. Med denna formel kan bindemedelshalten fås fram utan att använda lösningsmedel.

I projektet har ett 30-tal slumpvis utvalda prover undersökts, där kompaktdensiteten på massan, densiteten av bitumen från tanken och stenmaterialets korndensitet efter extraktion har bestämts.

FAS-metoderna 425, 228 och 480 samt IP 59 har använts, för bestämning av kompaktdensitet, korndensitet, bindemedelshalt och bindemedlets densitet. Vid bestämning av bindemedelshalten gav dubbelprovning på flertalet prover, max 0,05% skillnad i resultat mellan proverna.

Vid bestämning av korndensitet har filler från centrifugrören blandats med stenmaterial. Problem uppstod med att filler la sig i vattenytan men vid användning av isopropanol som utfyllnadsvätska fungerade det bra. Isopropanol är inte så farligt ur miljösynpunkt men det luktar väldigt obehagligt. Frågan är om bestämning av korndensiteten på hela stenmaterialet behövs?

Vid mätosäkerhetsanalys av beräkningsmetoden utgör korndensiteten 90% av totala mätosäkerheten. Mätosäkerheten på bindemedelshalten blev $\pm 0,08 \%$, på

korndensiteten $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$, på bindemedelsdensiteten $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ och på kompaktensiteten $\pm 0,0025 \text{ g/cm}^3$.

Försökens resultat gav en god överensstämmelse med extraktion med lösningsmedel. Differensen låg mellan $-0,37$ och $+0,25 \%$, med ett medelvärde på $-0,01 \%$ på 31 prover. Bra kontroll på stenmaterialets korndensiteten behövs, för att osäkerheten inte ska bli för stor.

Det finns även standardiserad metodbeskrivning på en provningsmetod, för bestämning av bindemedelshalten, utan att använda några lösningsmedel; ¹¹SS-EN 12697-39:2020, Vägmateriäl - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 39: **Bestämning av bindemedelshalt genom förbränning.**

Metoden går ut på att i stället för att extrahera bindemedlet med ett lösningsmedel, bränns bituminet i asfaltprovet bort i en förbränningsugn vid $540 \text{ }^\circ\text{C}$, se bild 2. Efter avsvälning tvättas stenmaterialet i vatten och bestämning av kornstorleksfördelning eller korndensitet kan göras.

Metoden kräver att stenmaterialets korrektionsfaktor först testas, genom förbränning med en känd mängd bindemedel. Metoden fungerar därför bäst som tillverkningskontroll och inte på okända asfaltmaterial, eller på stenmaterial som innehåller flera olika bergarter, i varierande halt.



Bild 2. Förbränningsugn, från Thermolyne, för bestämning av bindemedelshalt i asfalt, på Skanskas tidigare laboratorium i Lomma.

4.4. Övriga vetenskapliga artiklar

Vi har även studerat ett antal vetenskapliga artiklar, som handlat om olika sätt att ersätta halogenerade organiska lösningsmedel. Några av de lösningsmedel som tagits fram i dessa artiklar är samlade under kapitel 5, Tabell 1.

Litteraturstudien ¹²**Extraction and recovery of the asphalt binder: a literature review** av Mikhailenko och andra (2019), har studerat använda extraktionsmetoder, återvinningsmetoder och lösningsmedel, genom tiderna.

Studien kom fram till att automatisk extraktion, till exempel i en asfaltanalysator, är den säkrast extraktionsmetoden för användaren och ger mest konsekventa resultat.

Rotationsindunstaren var den återvinningsmetod som de ansåg var mest lättarbetad, tog bort mest lösningsmedel och åldrade bindemedlet minst.

Koldisulfid, har använts för asfaltextraktioner historiskt men har fasats ut på grund av hög brandfarlighet och flyktighet. Koldisulfid är giftigt, tränger lätt in i kroppen via huden och är troligen reproduktionsstörande.

Triklöretylen och metylenklorid är de mest använda lösningsmedlen för asfaltextraktioner och återvinning. De kan återanvändas för åtskilliga extraktioner men utgör en hälso- och säkerhetsrisk.

Ett annat lösningsmedel som också har använts mycket är n-propylbromid. Det löser returafalt bra och kan återvinnas men visade sig ha större giftighet än metylenklorid.

Toluen löser polymerbitumen bättre, är inte så hälsofarligt men är väldigt lättantändligt. En blandning med 85% toluen och 15% etanol, visade sig lösa polymerer bra.

De enda bio-lösningsmedel som hittades i litteraturen, var d-limonen och terpenextrakt.

I artikeln ¹³**Alternative Solvent for Reducing Health and Environmental Hazards in Extracting Asphalt** av Collins-Garcia och andra, byttes triklöretylen ut mot EnSolve, som var handelsnamn för n-propylbromid eller nPB. Samma extraktions- och återvinningsmetod som tidigare användes och resultaten var positiva. Men det visade sig att n-propylbromid orsakade huvudvärk, yrsel, illamående, irritation på hud, ögon och lungor.

Brenntag Noridc AB, kontaktade Skanska 2020, för att informera om några lösningsmedel som eventuellt skulle kunna ersätta metylenklorid. Methylal och Butylal, som lösningsmedlen hette, ansågs enligt tillverkaren Lambiotte & Cie, vara ofarliga för hälsan men med bra lösnings- och avfettningsförmåga, se figur 2 och 3.

	Methylal	Methylene Chloride	Acetone	MEK
Health				
Solvent Power				
Miscibility with water				

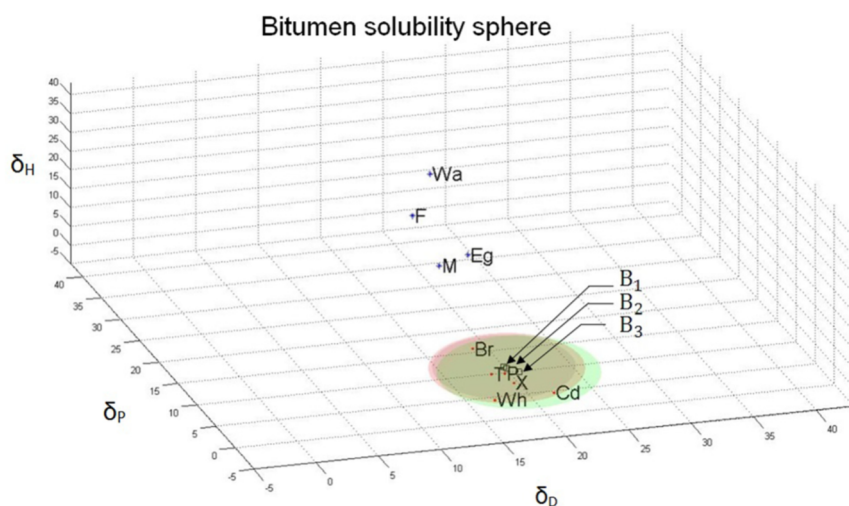
Figur 2. Methylals egenskaper på hälsa, lösningsförmåga och blandbarhet med vatten jämfört med Metylenklorid, Aceton och Metyletylketon, MEK, enligt Lambiotte & Cie's hemsida 2023-11-08.

	Butylal	d-Limonene	Dearomatized Hydrocarbons	Perchloroethylene
Health				
Environment				
Degreasing power				

Figur 3. Butylals egenskaper på hälsa, miljö och avfettningförmåga jämfört med d-limonen, avaromatiserat kolväte och Perklöretylen, enligt Lambiotte & Cie's hemsida 2023-11-08.

Enligt Brenntag's Säkerhetsdatablad för Methylal är lösningsmedlet skadligt vid förtäring, kan orsaka organskador och är mycket brandfarligt. Butylal kräver inget säkerhetsblad och anses inte innehålla något ämne som är hälsofarligt för människa eller orsaka miljöfara.

I artikel av Ziyani och andra (2017), ¹⁴**Bitumen extraction and recovery in road industry: A global methodology in solvent substitution from a comprehensive review**, visades Hansens löslighetsparametrar för tre bitumen, som benämndes B1, B2 och B3. Jämförelser av dessa löslighetsparametrar med 6 vanliga lösningsmedel och 4 andra ämnen som inte är lösningsmedel. Samtliga föreningar har lagt in i ett löslighetsdiagram, där det tydligt visas vilka föreningar som hamnar inom samma sfär som B1, B2 och B3 och därför är bra lösningsmedel för bitumen, se figur 4. Läs mer om Hansens löslighetsparametrar i kapitel 6.



Figur 4: Diagram med löslighetsparametrar för 3 bitumen, 6 lösningsmedel och 4 andra föreningar. P: perkloretylen, T: trikloreten, X: xylen, Br: bromopropan, Cd: koldisulfid, Wh: Lacknafta, Wa: vatten, F: formamid, M: metanol, Eg: etylenglykol. Från Ziyani och andra (2017).

4.5. Sammanfattning av relevanta erfarenheter från litteraturstudierna

Flera av de undersökningar som har studerats, visar att det är möjligt att extrahera bindemedel från asfaltmaterial, med andra lösningsmedel än klorerade organiska lösningsmedel.

I båda delarna av ^{6,7}SBUF-projekten, Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, visar att det finns flera alternativ.

I den första delen upptäcktes att Metylkokoat, 2-etylhexylkokoat och RME löser bitumenprodukter mycket bra. NMP, Methylal löser bitumenprodukter bra.

I den andra delen jämfördes extraktion av olika asfaltmassor innehållande penetrationsbitumen, med metylenklorid och RME, som krävde en efterföljande tvätt med en tensid. De olika lösningsmedlen gav väldigt små skillnader både vid bestämning av bindemedelshalt och kornstorleksfördelning. Nackdelen med RME är att en del av extraktionsåterstoden måste destrueras. Detta ökar kostnaderna både för destruktion och för större inköp av ny RME.

Även den tyska undersökningen som ⁸Bundesanstalt für Strassenwessens gav ut 2018, visar att det går att ersätta Tri med OME, för bestämning av bindemedelshalt.

Jämförande analyser gjordes på 7 olika asfaltmassor med 3 olika penetrationsbitumen och 2 olika polymerbitumen. Däremot lyckades inte studien ta fram en metod för att destillera ut ett rent bindemedel från bindemedelsextraktet.

I sitt ⁹föredrag på Metoddagen 2022, menar Martus från infraTest att det säkraste och mest miljövänliga sättet att hantera lösningsmedel, är i ett slutet system i en asfaltanalysator. OME löser visserligen asfaltmaterial men Tri löser asfalt snabbare och i atmosfärstryck, utan att riskera brand eller explosion. Däremot bildar Tri lätt saltsyra

vid närvaro av fukt, vilket kräver löpande kontroller av lösningsmedlet. OME var svårt att få tillgång till, vilket gjorde att projektet dog ut, enligt Martus.

De ^{10,11}alternativa metoderna utan lösningsmedel, som studerats, fungerar för bestämning av bindemedelshalt, enbart om korndensitet och korrektionsfaktor för stenmaterialet är kända.

Ingen av ovanstående undersökningarna, har lyckats destillera ut rent bindemedel från asfaltmassan, för vidare analyser.

I ¹²litteraturstudien av Mikhailenko och andra är asfaltanalysatorn och andra automatiska extraktionsmetoder, de säkraste extraktionsmetoderna för användaren, som även ger mest konsekventa resultat. Den mest effektiva och lättarbetade återvinningsmetoden var rotationsindunstaren, som dessutom åldrade bituminet minst. Studien konstaterade även att trikloretylen och metylenklorid är de mest använda lösningsmedlen för asfaltextraktioner och återvinning. De utgör en hälso- och säkerhetsrisk men kan återanvändas till flertalet extraktioner och inga andra lösningsmedel har visat sig helt riskfria och effektiva vid extraktion och återvinning av bindemedlet.

I en ¹³artikel av Collins-Garcia och andra, byttes trikloretylen ut mot EnSolve, vilket var n-propylbromid. USA tänkte förbjuda trikloretylen på grund av att lösningsmedlet är cancerogent och dess negativa påverkan på ozonlagret. I stället infördes n-propylbromid som ansågs säkrare, löste asfaltmaterial bra och kunde användas i befintliga extraktions- och återvinningsutrustningar. Dessutom kunde bindemedlet återvinnas för vidare analys. Tyvärr orsakade EnSolve hälsoproblem som huvudvärk, yrsel, illamående och irritation på hud, ögon och lungor.

Lösningsmedlen Methylal och Butylal, som tillverkas av Lambiotte & Cie och framställs som säkra, miljövänliga och effektiva ersättare till bland annat metylenklorid, studerades. Methylal är skadligt vid förtäring, kan orsaka organskador och är mycket brandfarligt. Butylal anses inte innehålla något ämne som är hälsofarligt för människa eller orsaka miljöfara men har en hög kokpunkt och låg flampunkt.

I en ¹⁴artikel av Ziyani och andra, jämfördes tre bitumen med 6 vanliga lösningsmedel och 4 andra ämnen som inte är lösningsmedel, i ett Hansens löslighetsdiagram. Diagrammet visade tydligt vilka ämnen som hamnar inom samma område som bitumentyperna och därför är bra lösningsmedel för bitumen. Hansens löslighetsdiagram studeras mer ingående i kapitel 6.

5. Lämpliga egenskaper för lösningsmedlet

5.1 Lösningsmedel som används idag

I provningsmetoden för bestämning av bindemedelshalt i asfaltmassa, ²SS-EN 12697-1:2020, står det att metoden kräver lösningsmedel som kan extrahera och i vissa fall även destillera ut bitumen från asfaltmassa. Exempel på sådana lösningsmedel är

enligt provningsmetoden metylenklorid, 1,1,1-trikloretan, bensen, trikloretylen, xylen, toluen och perkloretylen (tetrakloroetylen).

Dessa lösningsmedel är farliga för hälsa och miljö, i varierad grad. Laboratorielokalerna bör ha god ventilation och laboratoriepersonal som hanterar dessa lösningsmedel, bör få adekvat utbildning om dess risker och exponeringsmätningar bör utföras.

I provningsmetoden för återvinning av bindemedel i asfaltmassa med rotationsindunstare, ³SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, ska metylenklorid användas eller annat lämpligt lösningsmedel som toluen, tetrakloretylen, trikloretylen, xylen, 1,1,1-trikloretan och bensen. Bitumen är mindre lösligt i 1,1,1-trikloretan, än i de andra nämnda lösningsmedlen.

Dessa EN-metoder används i hela Europa. I Sverige används idag nästan uteslutande metylenklorid för extraktion av asfaltmassa och destillation av bindemedel ur asfaltmassa, medan trikloretylen vanligtvis används i Tyskland och övriga Europa.

REACH är en EU-förordning som trädde i kraft den 1 juni 2007. REACH står för registrering, utvärdering, tillstånd och begränsning av kemikalier och har tagits fram för att stärka skyddet av människors hälsa och miljö.

European Chemicals Agency, ECHA, är en myndighet inom EU, som ansvarar för REACH på EU-nivå. De tar fram information och lagstiftning om skadliga kemikalier, för att skydda personer och miljö. I Sverige är det Kemikalieinspektionen som har ansvaret för att REACH efterlevs.

Som en del av REACH har en kandidatförteckning tagits fram över särskilt farliga ämnen, SVHC, Substances of Very High Concern. Bland annat ligger trikloretylen och n-propylbromid, i denna förteckning.

5.2 De viktigaste egenskaperna

Det lösningsmedel som ska ersätta metylenklorid, vid extraktion och destillation av asfaltmaterial, bör ha samma upplösande egenskaper som metylenklorid men utan negativa risker ur miljö- och arbetsmiljöperspektiv. Lösningsmedlet bör även vara lättillgängligt och inte för dyrt.

Upplösande egenskaper:

Ett lämpligt ersättningslösningsmedel bör kunna lösa samtliga bindemedel som används i asfaltmaterial idag och i framtiden, samt de tillsatsmedlen som ingår i asfaltmaterial till exempel polymerer, vidhäftningsmedel och oljor.

De vanligaste bindemedlen i asfaltmaterial är bitumen, som tillverkas genom destillation av råolja. Bitumen klassificeras efter penetrationsvärdet och kallas då penetrationsbitumen. Bituminets egenskaper kan förbättras genom tillsätts av polymerer, bituminet kallas då polymermodifierat bitumen eller PMB. Olika polymerer förbättrar olika egenskaper hos bitumen.

Lösningsmedlet ska dessutom lösa asfaltprover snabbt och vid en så låg temperatur, att bindemedlet inte förstörs. I den litteratur som har studerats, har flera olika undersökningar på lösligheten av bindemedel gjorts.

I en studie från Schweiz, ¹⁹**Extraction and recovery of polymer modified bitumen** (2016) av Hugener & Pittet, undersöktes extraktion, återvinning av bindemedel och analys på det återvunna bindemedlet. Fem olika PMB, som är tillgängliga på schweiziska marknaden, extraherades med fyra olika lösningsmedel, toluen, xylen, metylenklorid och trikloretylen. Samtliga lösningsmedel föreslås i SS-EN 12697-3. Skillnaden mellan jungfrulig och återvunnen PMB var anmärkningsvärt små men ett av bindemedlen löstes inte upp av metylenklorid.

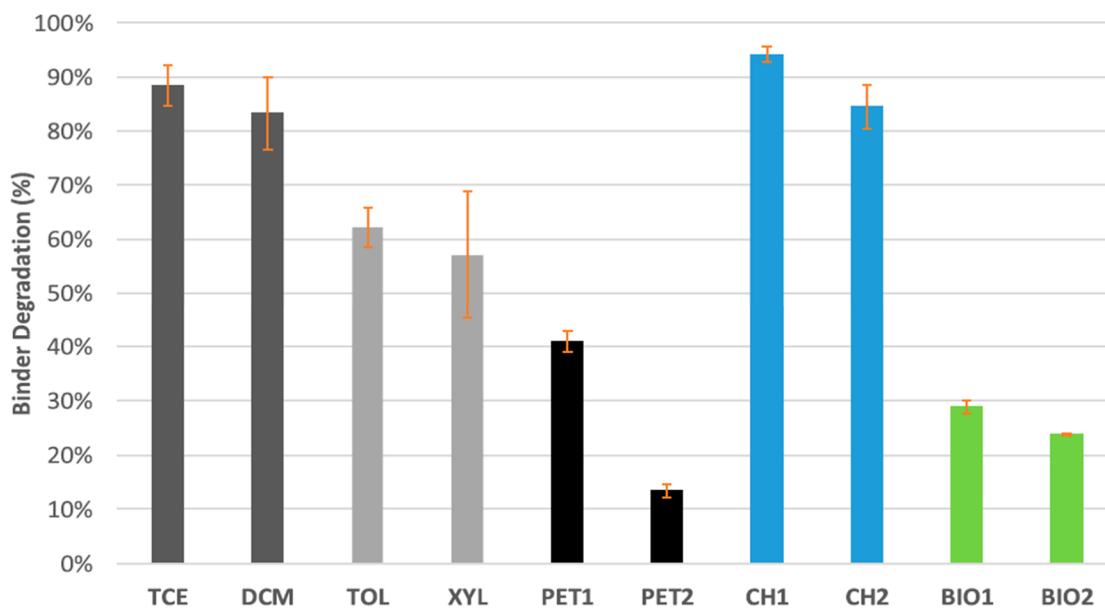
I ⁶SBUF-projektet, **Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, del 1**, gjordes upplösningsförsök med olika lösningsmedel, som alla anses mindre miljö- och hälsofarliga än metylenklorid och andra halogena och organiska lösningsmedel.

200 g asfaltmassa och 0,5 liter lösningsmedel hälldes i en bägare. Okulär bedömning gjordes efter 1 h, 4 h, 8 h, 3 dygn och 1 vecka vid rumstemperatur, av upplösningen. Resultatet blev att Metylkokoat, 2-etylhexylkokoat och RME löser bitumenprodukter mycket bra. NMP, Methylal löser bitumenprodukter bra. Övriga testade lösningsmedel, Dioxolane, Santosol och Dowanol PM, löser inte bitumenprodukter alls eller dåligt, vid rumstemperatur.

I en artikel från 2019, ¹⁵**Evaluation of solvents for asphalt extraction**, av Peter Mikhailenko, Glenn Webberc och Hassan Baaja, har ett annat upplösningsförsök utförts.

Ett bindemedelsprov på 12 ± 2 g, med samma storlek, sänktes ner i lösningsmedlet under 2 timmar i rumstemperatur. Tiden ska efterlikna den tid som asfaltprovet exponeras för lösningsmedel, under extraktionen. Efter 2 timmar töms lösningsmedlet ut och det kvarvarande bindemedlet vägdes. Tre delprover gjordes och medelvärdet av viktförlusten i %, togs som en indikation på hur effektivt lösningsmedlet var. Se resultaten i figur 5. Upplösningstestet hade tagits fram av Mikhailenko, Ringot, Bertron och Escadeillas, 2015, för att utvärdera asfaltborttagares effektivitet.

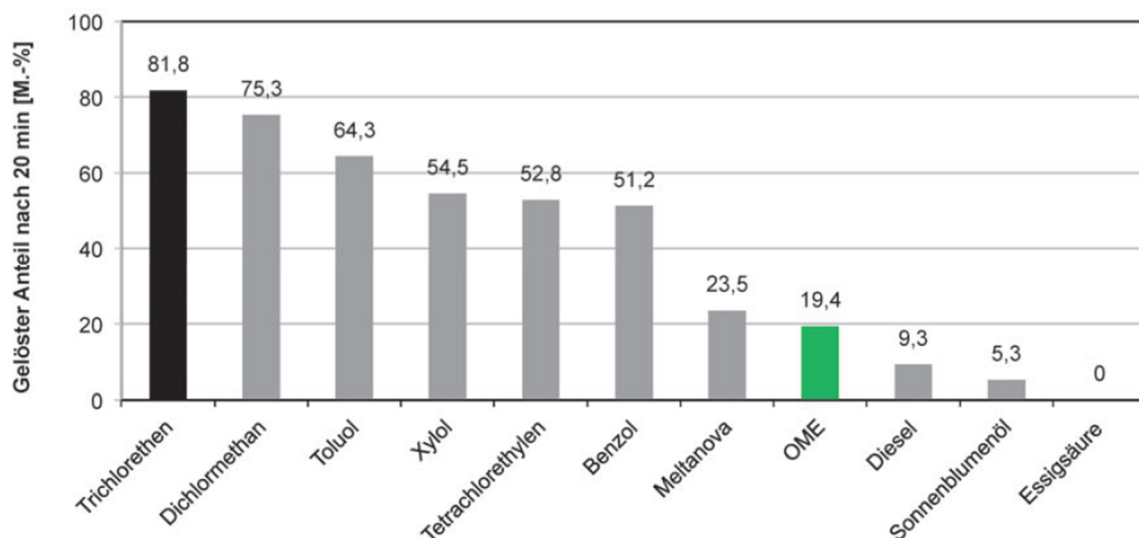
Bäst löser de lösningsmedel som innehåller kloratomer: trikloretylen, metylenklorid och de klorerade lösningsmedelsblandningarna CH1 och CH2. Sedan kommer de organiska lösningsmedlen utan kloratomer, toluen och xylen. Sämst löser de biobaserade och petroleumbaserade lösningsmedlen.



Figur 5, Upplösningstest av PG 64-28, med olika lösningsmedel. Orange markering är standardavvikelsen, på de tre delproverna. TCE=trikloretylen, DCM=metylenklorid, TOL=toluen, XYL=xylen, Pet1 och Pet2=petroleumbaserade lösningsmedel, CH1 och CH2=klorerade lösningsmedelsblandningar och BIO1 och BIO2=biobaserade lösningsmedel, varav BIO1 är ett d-limonen-baserat lösningsmedel och BIO2 är ett kortkedjigt esterbaserat lösningsmedel.

Även i det tyska projektet från 2018, **Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester** (Kokosester), gjordes upplösningstest.

Ett bitumenprov på 25 ± 1 g, av penetrationsbituminet 50/70, sänktes ner i ett 400 ml stort bad med olika lösningsmedel vid $26 \text{ }^\circ\text{C}$ under 20 minuter. Viktförlusten i %, för bitumenproven bestämdes genom vägning före och efter bad, se figur 6.



Figur 6, Upplösningstest av 50/70, med olika lösningsmedel, trikloretylen, metylenklorid, toluen, xylen, tetrakloretylen, bensol, Meltanova, OME, diesel, solrosolja och ättiksyra.

Även i detta försök löser de lösningsmedel som innehåller kloratomer och de organiska lösningsmedlen utan kloratomer, bäst.

Samtliga upplösningsförsök har utfört i eller nära rumstemperatur.

Miljö:

Kemikalier som är farliga för djur och växter kallas för miljögifter. Miljögifter är oftast inte naturligt förekommande och släpps ut i miljön från fabriker, företag eller hushåll genom skorstenar, avloppsvatten eller avfall. Dessa miljögifter kan vara svåra att bryta ner i naturen. De finns då kvar länge och kan sprida sig med vind och djur. De kan vara direkt dödliga för djur och växter, påverka djurens förmåga att fortplanta sig, tas upp av levande organismer, ansamlas via födan i vävnader och koncentration ökar med tiden.

Om ett lösningsmedel är farligt för miljön, ska detta framgå av säkerhetsdatabladet, SDB eller av etiketten på lösningsmedlets förpackning. Se farosymbolen på bild 3. Metylenklorid anses inte miljöfarligt. Med risk för ett eventuellt utsläpp bör alternativa lösningsmedel inte vara farliga för miljön.



Bild 3. Farosymbolen Miljöfarlig, betyder att produkten kan vara farlig för miljön.

Arbetsmiljö:

Kemikalier eller blandningar av flera kemiska ämnen, kan vara hälsofarliga vid exponering. Det kan innebära genom inandning, förtäring eller kontakt med hud, slemhinnor eller ögon. Kemikalier kan också vara irriterande för hud, luftvägar, orsaka allergier, vara brandfarliga, orsaka explosion eller minska halten syrgas i luften.

Klorerade lösningsmedel som metylenklorid, tri- och tetrakloretylen används som avfettnings-, lösnings- och extraktionsmedel. De flesta klorerade lösningsmedel är förbjudna eller är användningen begränsad. Symptom vid exponering genom hudkontakt och inandning är huvudvärk, trötthet, illamående, yrsel, medvetslöshet men hjärtverksamheten kan även störas. Flera klorerade lösningsmedel är cancerframkallande. Nedbrytningsprodukter som vinylklorid är mycket giftig, mycket flyktig och extremt brandfarlig.

Aromatiska kolväten till exempel bensen, toluen och xylen är alla hälsofarliga vid hudkontakt och inandning, kan orsaka skador på organ, lever, njurar, centrala-

nervsystemet och kan vara dödligt vid förtäring om det kommer ner i luftvägarna. Det är brandfarligt både i vätska och ånga. Bensen kan även vara cancerframkallande.

Om ett lösningsmedel har hälsofarliga egenskaper, ska detta framgå av säkerhetsdatabladet, SDB eller av etiketten på lösningsmedlets förpackning. Se olika exempel på farosymboler på bild 4. Metylenklorid anses skadligt och hälsofarligt. Alternativa lösningsmedel bör inte vara hälsofarliga.



Bild 4. Farosymboler Giftigt, Skadligt, Hälsofarligt, Brandfarligt och Explosiv.

Fysikaliska och kemiska egenskaper:

Ett lösningsmedel för asfaltextraktion bör ha låg kokpunkt, så bindemedlet inte förstörs vid extraktionen och som gör det lätt att destillera bort. Flampunkt ska antingen inte finnas eller vara så hög, att risk för explosion och brand undviks. Metylenklorid har en kokpunkt på ca 40 °C och ingen flampunkt, medan flera ersättningslösningsmedel har hög kokpunkt och ibland får extraktionerna utföras under tryck.

I tabell 1 redovisas några relevanta fysikaliska och kemiska egenskaper för lösningsmedel, som ingått i den litteratur vi studerat. Egenskaperna i tabellen är hämtad från den litteratur vi studerat eller från säkerhetsdatablad på nätet.

Tillgänglighet

Ersättningslösningsmedlet ska vara lättåtkomligt, med snabba leveranser, gärna inom en vecka och räcka till samtliga asfaltlaboratoriers förbrukning.

Om leveranserna kommer ta längre tid, kan laboratorierna tvingas ha mer lösningsmedel på lager. Detta kan medföra högre lokalhyra, kräva tillstånd och ställa krav på lagerlokalens utformning.

Tabell 1. Fysikaliska och kemiska egenskaper för olika lösningsmedel.

Lösningsmedel	Typ av lösningsmedel	Densitet, g/cm ³	Kokpunkt, °C	Flampunkt, °C	Brandfarlighet
Metylenklorid	Klorerat kolväte	1,33	40	-	Nej
Trikloretylen	Klorerat kolväte	1,47	87,2	-	Nej
1,1,1-trikloretan	Klorerat kolväte	1,34	74	-	Nej
Tetrakloretylen	Klorerat kolväte	1,61	121,4	-	Nej
Bensen	Aromatiskt kolväte	0,87	80,1	-11	Ja
Toluen	Aromatiskt kolväte	0,87	111	6	Ja
Xylen	Aromatiskt kolväte	0,86	139,1	27	Ja
n-propylbromid	Bromerat kolväte	1,35	71	69	Ja
Koldisulfid, CS ₂	Oorganisk förening	1,26	46,3	-30	Ja
Metyloktanoat, OME	Karboxylsyra-ester	0,877	192,6	82	Nej
Metylkokoat	Ester	0,86	207	130	Nej
Etylhexylkokoat	Ester	0,86	>214,5	171	Nej
Rapsmetylester, RME	Ester	0,88	280-350	140	Nej
Methylal	Eter	0,86	42	-30	Ja
Butylal	Eter	0,84	182,5	62,2	Nej
Dowanol PM	Alkohol/Eter	0,92	120	31	Ja
NMP	Cykliskt kolväte	1,03	202	90	Nej
Dioxolane	Acetal	1,06	74	-18	Ja
Santosol	Ester	1,06	208	100	Nej
d-limonen	Terpentin	0,84	176	46	Ja

Ekonomi:

Ur ett ekonomiskt perspektiv får hänsyn tas till ersättningslösningsmedlets inköpspris, hur stor mängd lösningsmedel som förbrukas per prov, hur stor andel av lösningsmedlet, som går att återvinna och om någon del av extraktionsåterstoden behöver destrueras.

Inköpspriset för metylenklorid, var den 27 september 2023, 46,20 kr/kg enligt Brenntag Nordic AB. Eftersom metylenklorid har en låg kokpunkt på ca 40 °C, är det lätt att återvinna genom destillation och separera metylenkloriden från asfaltprovets bindemedel. Samtidigt är det lätt att en del av metylenkloriden, dunstar bort i hanteringen. Bindemedel från extraktionerna blir kvar efter destillationen och behöver destrueras. Vid en jämförelse mellan olika företag som hämtar farligt avfall, tar de drygt 10 kr/kg bitumenrest, för att ta emot och destruera denna återstod.

Metylenkloriden kostar 46,20 kr/kg, men med en densitet på 1,33 g/ml, enligt Brenntags säkerhetsdatablad, motsvara det 61,45 kr/liter.

Förbrukningen av metylenklorid är ca 0,35 liter/prov, vilket ger en kostnad för den förbrukade metylenkloriden på 21,50 kr/prov. Förbrukningen är erfarenhet från ca 20 års användning av asfaltanalyser.

Om vi antar ett genomsnittligt prov väger 1500 g och innehåller 6 vikts-% bindemedel, så blir mängden bindemedel att destruera: 90 g per prov. Kostnaden för destruktionsen blir då 0,90 kr per prov. Totalt blir kostnaden för metylenkloriden 22,40 kr/prov.

Vid byte av lösningsmedel, får eventuellt ny extraktions- och återvinningsutrustning köpas in. Martus på infraTest Prüftechnik GmbH, uppskattade att en explosions säker extraktionsutrustning kunde bli upp till 150% dyrare, än den vanliga utrustningen.

5.3 Egenskapernas prioriteringsordning

Självklart måste högsta prioritet vara att ersättningslösningsmedlet är riskfritt att använda för laboratoriepersonalen och inte heller medföra risker för djur och natur vid ett eventuellt utsläpp.

Även om det finns bra arbets- och hanteringsrutiner som innebär att även mindre hälsosamma lösningsmedel, kan anses säkra för laboratoriepersonal och miljö, bör även risken att det kan hända olyckor, vägas in.

En bra lösningsförmåga av samtliga binde- och tillsatsmedel, är en förutsättning för att provningen ger ett korrekt resultat. Detta bör också prioriteras högt.

Ett lösningsmedel som är lättillgängligt, med snabba leveranser underlättar också möjligheten att få snabba provresultat och undvika att laboratorierna måste ha lösningsmedel på lager.

Ett återvinningsbart lösningsmedel med låg förbrukning och lite restprodukter, ger tillsammans med ett lågt inköpspris en låg total kostnad.

Projektets styr- och referensgrupp prioriterar därför lösningsmedlens egenskaper enligt följande:

1. Arbetsmiljö
2. Miljö
3. Upplösande egenskaper
4. Tillgänglighet
5. Ekonomi

6. Tekniska metoder för val av alternativa lösningsmedel och upplösning av dem

I undersökningarna om alternativa lösningsmedel till metylenklorid och trikloretylen, vid extraktioner av asfalt, är det uppenbart att sökandet efter lämpliga ersättare har varit fullt av utmaningar. Det har gjorts många försök att ersätta dessa hälsofarliga ämnen, men inget perfekt lösningsmedel har hittats, på grund av bland annat de unika egenskaper som krävs och tillgängligheten av lösningsmedel. Men i vår litteraturstudie har vi identifierat möjliga tekniker för att hitta lämpliga lösningsmedel och upplösningmetoder, som skulle kunna hantera detta långvariga problem.

6.1 Möjliga lösningsmedel

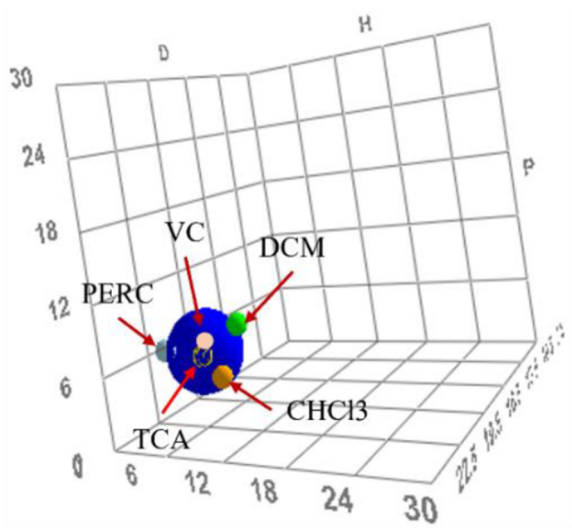
I försöken att identifiera ett lösningsmedel som är säkert och inte farligt för hälsan vid extraktion av asfaltmaterial, kan konstateras att problemet är komplext. Det nya lösningsmedlet måste inte bara fungera med nuvarande bindemedelssorter, utan måste även fungera på biobaserade bindemedel och tillsatser, eftersom asfaltbranschen inom kort behöver utveckla klimatneutrala asfaltmaterial, för att nå de klimatmål som säkerställer bygg- och anläggningssektorns färdplan mot ett Fossilfritt Sverige.

En metod för att utvärdera olika lösningsmedel är tillämpningen av Hansen Solubility Parameters (HSP). HSP är ett koncept med rötter i termodynamiken som beskriver olika ämnens kompatibilitet. HSP har potentialen att kunna lösa omedelbara utmaningar, så väl som att säkra framtidens val av lösningsmedel.

Metoden har tidigare använts på bitumen, vilket beskrivs i artikeln ¹⁶**Solubility parameters and bitumen** av Redelius (2000), för att förutsäga deras affinitet med lösningsmedel. Baserat på bindemedelslöslighetsparametrar och så kallade sfärradier undersöktes om flertalet av de lösningsmedel som används för extraktion och återvinning, föll inom löslighetssfärerna eller inte.

Här föreslås ett alternativt tillvägagångssätt. För att ersätta de klorerade organiska lösningsmedlen planeras användning av en unik kombination av olika tekniker. Första steget innefattar att använda HSP-programmet (och tillhörande databaser) för att förutsäga ersättningslösningsmedel som presterar liknande klorerade lösningsmedel men har en bättre profil med avseende på människors hälsa och miljö. Efterföljande används ADME Predictor/Leadscope in-silico-verktyg, för att utvärdera toxicitet och för att undvika substitution till andra olämpliga lösningsmedel.

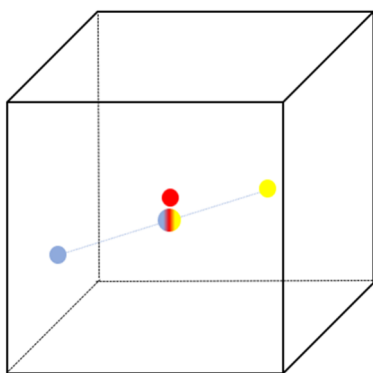
Som syns i figur 7, packas alla klorerade lösningsmedel i en specifik del eller sfär av HSP-diagrammet. Denna del i diagrammet innehåller även andra lösningsmedel, som kan lösa upp samma ämnen men som inte är lika hälsofarliga.



Figur 7. HSP sfären för de flesta klorerade lösningsmedlen.

6.2 Lösningsmedelsblandningar

Ett annat sätt att hitta lämpliga lösningsmedel, är att blanda flera lösningsmedel. HSP-programmet kan föreslå olika lösningsmedel, med bättre egenskaper för miljö och arbetsmiljö, som i specifika proportioner, resulterar i blandningar som ligger nära bindemedlets upplösningssfär och därför blir ett mycket bra lösningsmedel för bindemedlet. Detta trots att lösningsmedlen var för sig ligger utanför denna sfär, se figur 8.



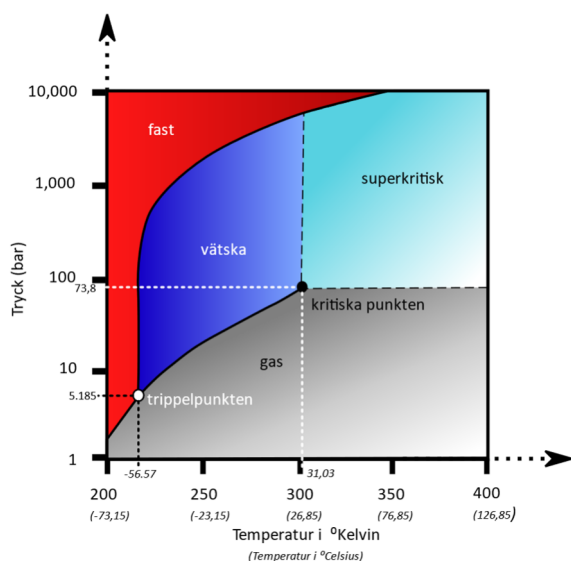
Figur 8. En blandning av två lösningsmedel, som tillsammans blir ett bra lösningsmedel.

6.3 2-steg med 2 olika lösningsmedel

Ytterligare en användning för HSP-programmet, är att ta fram två olika lösningsmedel som används för upplösning i två steg. I det första steget tas ett lösningsmedel fram som effektivt kan lösa upp bindemedlet i asfaltmaterialet. I det andra steget tas ett separat lösningsmedel fram som, när det tillsätts i bindemedels- och lösningsmedelsblandningen, faller ut det första lösningsmedlet. Det andra steget används för att förenkla återvinningsprocessen genom att underlätta separationen av lösningsmedlet från bindemedlet, vilket i slutändan leder till en mer effektiv återvinning.

6.4 Superkritisk koldioxid, scCO₂

Superkritisk koldioxid (scCO₂) representerar ett unikt tillstånd av koldioxid som uppnås genom att utsätta koldioxiden för högt tryck och temperatur, se figur 9. I detta tillstånd beter sig koldioxiden som en gas, som lätt sprider sig i hela sin behållare, samtidigt som den bibehåller en densitet som liknar den för en vätska. ScCO₂ kan användas som lösningsmedel av opolära ämnen och genom att tillsätta ett hjälplösningsmedel som etanol, kan dessutom denna lösningsmedelsblandning användas för att lösa upp polära ämnen. ScCO₂ har dessutom hög löslighet, låg giftighet och är inte brandfarlig.



Figur 9. Fasdiagram för koldioxid.

Extraktion med scCO₂ av bitumen har testats och beskrivits i artikeln ¹⁸**Upgrading and extraction of bitumen from Nigerian tar sand by supercritical carbon dioxide** av Rudyk och Spirov, 2014. Flera försök utfördes med tjärsand, som extraherades vid olika tryck, med eller utan tillsatser av salt- eller färskvatten.

Tekniken med scCO₂ har flera fördelar i jämförelse med konventionella lösningsmedelsbaserade metoder. Den använder inga flyktiga lösningsmedel, kräver mindre energi i form av värme och minskar utsläppen av växthusgaser. Det är dock viktigt att notera att även om den här tekniken verkar lovande, så är den

fortfarande i utvecklingsstadiet och kanske ännu inte är helt redo för kommersiell implementering.

6.5 Joniska vätskor, IL

Joniska vätskor, ionic liquids, IL, har fått uppmärksamhet som potentiella lösningsmedel för olika tillämpningar på grund av deras unika egenskaper som låg flyktighet, hög termisk stabilitet och avstämbara kemiska egenskaper. Att använda joniska vätskor för extraktion av asfaltmaterial och återvinning av bitumen på asfaltlaboratorier kan dock

innebära både möjligheter och utmaningar. Fördelarna med joniska vätskor är många, de är flytande vid rumstemperatur, luktfria, ej brandfarliga och har hög lösningsförmåga. Nackdelarna med joniska vätskor är att de är dyra, svårtillgängliga och kan vara giftiga.

En studie med titeln ¹⁸**Ionic liquids-based bitumen extraction: Enabling recovery with enviromental footprint comparable to conventional oil** av Berton och andra (2010), visade att bitumenextraktion ur oljesand baserad på joniska vätskor ledde till effektiv utvinning av bitumen i rumstemperatur, utan konventionella lösningsmedel, med minimal energiförbrukning och utan att generera vattenhaltigt avfall. De använde IL-trioktylammoniumoleat ([HN 888][Oleate]) i ett förhållande på 1:3 IL/oljesand-massaförhållande, se bild 5.

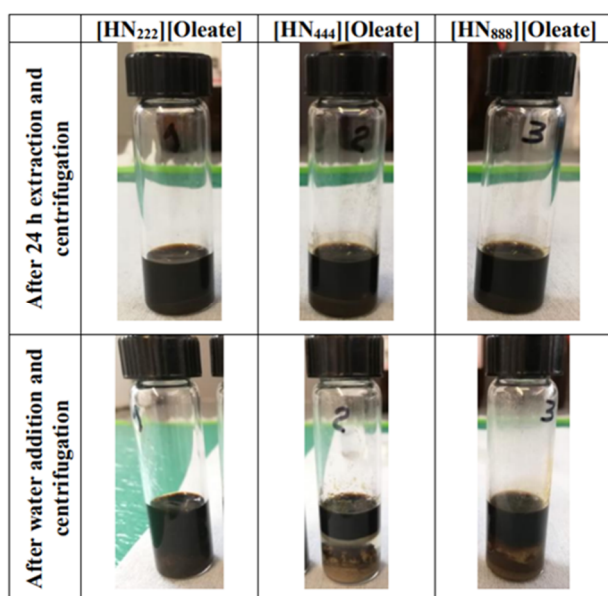


Bild 5. Försök på bitumenextraktion från oljesand, med trialkylammoniumbaserade IL.

7. Slutsatser

Litteratur från flertalet utvecklingsprojekt och vetenskapliga artiklar på undersökningar, som utförts för att ersätta befintliga lösningsmedel och extraktionsmetoder, har studerats. Flera undersökningar, visar att det är möjligt att extrahera bindemedel från asfaltmaterial, med andra lösningsmedel än klorerade organiska lösningsmedel. Det har framkommit att flera typer av kolväten är bra lösningsmedel. Flera klorerade-, bromerade-, aromatiska- och cykliska kolväten har visat sig lösa bindemedel från asfalt bra. Även flera estrar, terpenar och etrar har undersökts med goda resultat.

Extraktion av asfalt med olika bindemedelstyper, har utförts med rapsmetylester, RME och metyloktanoat, OME. Båda lösningsmedlen gav bra överensstämmelse av bindemedels- och fillerhalt, med annan extraktionsmetod. Vid försöken med RME krävdes en efterföljande tvätt med en tensid, för att få ett rent stenmaterial. En del av

extraktionsåterstoden behövde destrueras. Detta ökade kostnaderna för metoden. Vid försöken med OME kunde extraktionerna och återanvändning av lösningsmedlet utföras i en asfaltanalysator. Däremot fanns lösningsmedel kvar i bindemedlet, så att efterföljande analyser inte blev korrekta.

Spektrofotometri har provats efter upplösning och utspädning av ett asfaltsprov, med mindre farliga lösningsmedel. Metoden gav bra överensstämmelse med extraktionsmetod men lösningen måste spädas ut mycket, för att bindemedelshalten skulle kunna bestämmas.

Bindemedelshalten i asfalt kan även analyserats med helt lösningsmedelsfria metoder som förbränningsmetoden och genom beräkning. Dessa metoder fungerar enbart för bestämning av bindemedelshalt, om korndensitet och korrektionsfaktor för stenmaterialet är kända.

Ingen av ovanstående undersökningarna, har lyckats destillera ut rent bindemedel från asfaltmassan, för vidare analyser. Vid en undersökning av antalet analyser, de senaste åren, visar sig att 10 – 15 % av antalet extraktionerna, går vidare för återvinning av bindemedlet. Kan vi ersätta metylenklorid vid 85 – 90 % av analyserna, gör det ändå en stor skillnad på både säkerhet och miljö.

I USA förbjöds trikloretylen på grund av att lösningsmedlet är cancerogent och dess påverkan på ozonlagret. I stället infördes n-propylbromid som ansågs säkrare, löste asfaltmaterial bra och kunde användas i befintliga extraktions- och återvinningsutrustningar. Dessutom kunde bindemedlet återvinnas för vidare analys. Tyvärr visade sig n-propylbromid orsaka huvudvärk, yrsel, illamående och irritation på hud, ögon och lungor.

Litteraturstudier visar att de säkraste extraktionsmetoderna för användaren är asfaltanalysatorn och andra automatiska extraktionsmetoder. De ger även mest konsekventa resultat. Den mest effektiva och lättarbetade återvinningsmetoden var rotationsindunstaren, som dessutom åldrade bituminet minst. De mest använda lösningsmedlen för asfaltextraktioner och återvinning är trikloretylen och metylenklorid, trots att de utgör en hälso- och säkerhetsrisk och flertalet andra lösningsmedel har provats. Fördelen är att de återanvändas till flertalet extraktioner och inga andra lösningsmedel har visat sig helt riskfria eller effektiva vid extraktion och återvinning av bindemedlet.

Förutom litteraturstudier har en sammanställning av lämpliga egenskaper på alternativa lösningsmedel tagits fram. Dessa egenskaper delades upp i miljö-, arbetsmiljö-, löslighet-, tillgänglighet- och ekonomiperspektiv.

Kemikalier som är farliga för djur och växter är oftast inte naturligt förekommande, utan släpps ut i luft, vatten eller mark. De är svåra att bryta ner i naturen och finns kvar länge. De är antingen dödliga för djur och växter, påverka djurens förmåga att fortplanta sig, tas upp av levande organismer eller ansamlas via födan i vävnader. Lättast är att läsa i kemikaliernas säkerhetsdatablad eller på förpackningen om de är farliga för miljön. Alternativa lösningsmedel bör inte vara farliga för miljön.

Kemikalier eller blandningar av flera kemiska ämnen, kan även vara hälsofarliga vid exponering. Det kan innebära genom inandning, förtäring eller kontakt med hud, slemhinnor eller ögon. Symptom vid exponering genom hudkontakt och inandning är huvudvärk, trötthet, illamående, yrsel, medvetslöshet men hjärtverksamheten kan störas. Flera klorerade lösningsmedel är också cancerframkallande. Kemikalier kan även vara brandfarliga, orsaka explosion eller minska halten syrgas i luften. Även här är det lättast att läsa i kemikaliernas säkerhetsdatablad eller på förpackningen om de är hälsofarliga. Alternativa lösningsmedel bör inte vara hälsofarliga.

Ett lämpligt ersättningslösningsmedel bör kunna lösa samtliga bindemedel som används i asfaltmaterial idag och i framtiden, samt de tillsatsmedlen som ska ingå i bindemedelshalten till exempel vidhäftningsmedel. Lösningsmedlet ska dessutom lösa asfaltprover snabbt och vid en så låg temperatur, att bindemedlet inte förstörs. I den litteratur som studerats, har flera olika undersökningar på lösligheten av bindemedel gjorts och det kan konstateras att de lösningsmedel som innehåller kloratomer och de organiska lösningsmedlen utan kloratomer, löser bindemedlen i försöken bäst. Samtliga upplösningförsök utfördes i eller nära rumstemperatur.

Alternativa lösningsmedlet bör vara lättåtkomliga, med snabba leveranser, för att laboratorierna inte ska tvingas ha lösningsmedel på lager. Detta kan medföra högre lokalhyra, kräva tillstånd och ställa krav på lagerlokalens utformning.

Ur ett ekonomiskt perspektiv ska hänsyn tas till ersättningslösningsmedlets inköpspris, hur stor mängd lösningsmedel som förbrukas per prov, hur stor andel av lösningsmedlet, som går att återvinna och om någon del av extraktionsåterstoden behöver destrueras. Vid byte av lösningsmedel, får eventuellt ny extraktions- och återvinningsutrustning köpas in. Denna kan bli betydligt dyrare än den befintliga utrustningen.

En lista på relevanta fysikaliska och kemiska egenskaper för några befintliga och alternativa lösningsmedel, som ingått i den litteratur som studerats, har sammanställts i tabell 1.

Den prioriteringsordningen på egenskaperna som styr- och referensgruppen tagit fram är följande:

1. Arbetsmiljö
2. Miljö
3. Upplösande egenskaper
4. Tillgänglighet
5. Ekonomi

I studien av olika upplösningmetoder har fokus legat på Hansens Solubility parameters, HSP eller Hansens löslighetsparametrar. Genom att lägga in löslighetsparametrar för lösningsmedel eller det som ska lösas i ett program, kan ett 3D-diagram skapas, där det går att utläsa vilka lösningsmedel som löser vilka kemiska ämnen. Eftersom ett stort antal ämnen är inlagda i databasen kan förslag på till exempel mer miljö- eller arbetsmiljövänliga lösningsmedel ges.

Om inga lämpliga lösningsmedel finns, kan förslag på blandningar av 2 eller flera lösningsmedel och deras proportioner ges. Ytterligare användning är att få förslag på lösningsmedel som effektivt löser det som ska lösas i ett första steg och sedan i det andra steget tillsätts ett annat lösningsmedel som faller ut det första lösningsmedlet. Detta underlättar separationen och förenklar återvinningsprocessen.

Superkritisk koldioxid (scCO₂) är ett tillstånd av koldioxid som uppnås genom att utsätta koldioxiden för högt tryck och temperatur. I detta tillstånd beter sig koldioxiden som en gas, samtidigt som den bibehåller en densitet som liknar den för en vätska. ScCO₂ kan användas som lösningsmedel av både opolära ämnen och genom tillsatts av ett hjälplösningsmedel, även av polära ämnen. ScCO₂ har hög löslighetsförmåga, låg giftighet och är inte brandfarlig. Den här tekniken är fortfarande i utvecklingsstadiet och kanske inte helt redo för kommersiell implementering.

Joniska vätskor, IL, är också potentiella lösningsmedel för olika tillämpningar. Fördelarna med joniska vätskor är många, de är flytande vid rumstemperatur, luktfria, ej brandfarliga och har hög lösningsförmåga. Nackdelarna med joniska vätskor är att de är dyra, svårtillgängliga och kan vara giftiga.

Slutligen kan förstudien sammanfattas med att det finns många lämpliga alternativ på lösningsmedel eller blandningar och fler kan föreslås med HSP-programmet. Det finns även flera olika tekniska upplösningsmetoder som kan vara användbara för att lösa asfaltmaterial med.

Så det finns stora möjligheterna att hitta alternativa lösningsmedel, för att ersätta metylenklorid.

Litteraturförteckning

¹Bitumenbundna lager, TDOK 2013:0529, (Version 4.0) Trafikverkets Styrande och stödjande dokument. s.1-141.

²SS-EN 12697-1:2020, Vägmaterial - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 1: Löslig bindemedelshalt, SIS, Svenska Institut för standarder. s.1-52

³SS-EN 12697-3:2013+A1:2019, Vägmaterial - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 3: Återvinning av bindemedel: Rotationsindunstare, SIS, Svenska Institut för standarder. s.1-13

⁴SFS 1998:944, Förordning (1998:944) om förbud m.m. i vissa fall i samband med hantering, införsel och utförsel av kemiska produkter

⁵Kemikalieinspektionens föreskrift (KIFS 2017:7) om kemiska produkter och biotekniska organismer

⁶Karlsson, T. (2001): Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, del 1. SBUF-projekt nr 9103. s.1-19.

- ⁷Karlsson, T. (2002): Alternativa lösningsmedel som ersättning för metylenklorid vid extraktion av asfalt, del 2. SBUF-projekt nr 11038. s.1-13.
- ⁸Alisov, A. & Wistuba, M P. (2018): Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester). Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS) s.1-151.
- ⁹Martus, M. (2022): Development testing equipment. How can we remove methylene chloride? infraTest Prüftechnik GmbH, ett föredrag på Metoddagen 2022
- ¹⁰Karlsson, T. (2002): Lösningssmedelsfri metod för att bestämma bindemedelshalt och kornstorleksfördelning, Del A. SBUF-projekt nr 11125. s. 1-5.
- ¹¹SS-EN 12697-39:2020, Vägmaterial - Asfaltmassor - Provningsmetoder - Del 39: Bestämning av bindemedelshalt genom förbränning, SIS, Svenska Institut för standarder s.1-19
- ¹²Mikhailenko, P., Parinaz, A. & Baaj, H. (2019): Extraction and recovery of the asphalt binder: a literature review. International Journal of Pavement Research and Technology 13(2) s.1-12. DOI:10.1007/s42947-019-0081-5
- ¹³Collins-Garcia, H., Tia, M., Roque, R. & Chobane, B. (2000): Alternative Solvent for Reducing Health and Environmental Hazards in Extracting Asphalt. Transportation Research Record Volume 1712, Issue 1, p. 79-85. DOI: 10.3141/1712-10
- ¹⁴Ziyani, L., Boulangé, L., Nicolai, A. & Mouillet, V. (2017): Bitumen extraction and recovery in road industry: A global methodology in solvent substitution from a comprehensive review. Journal of Cleaner Production Volume 161, s. 53-68. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.022
- ¹⁵Mikhailenko, P., Webber, G. & Baaj, H. (2019): Evaluation of solvents for asphalt extraction. Road Materials and Pavement Design 22, s. 1-12. DOI:10.1080/14680629.2019.1661277
- ¹⁶Redelius, P. (2000): Solubility parameters and bitumen. Fuel Volume 79, Issue 1, s. 27-35. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00103-9
- ¹⁷Rudyk, S. & Spirov, P. (2014): Upgrading and extraction of bitumen from Nigerian tar sand by supercritical carbon dioxide. Applied Energy Volume 113, s. 1397-1404 DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.076
- ¹⁸Berton, P., Manouchehr, S., Wong, K., Ahmadi, Z., Abdelfatah, E., Rogers, R D. & Bryant, S L. (2019): Ionic liquids-based bitumen extraction: Enabling recovery with environmental footprint comparable to conventional oil. ACS Sustainable Chemistry Engineering 2020,8. S.632-641 DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b06336
- ¹⁹Hugener, M & Pittet, M. (2016): Extraction and recovery of polymer modified bitumen. s. 1-9. DOI: 10.14311/EE.2016.082