

Inverkan av tallbecksolja på asfalts styvhet och deformationsegenskaper

**Biobindemedel som ersättning av konventionellt
bindemedel**



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Trafik och väg**

Examensarbete:
Patrik Olshage

© Copyright Patrik Olshage

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

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

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2022

Förord

Det här examensarbetet är skrivet vårterminen 2022 som avslutande del på Högskoleingenjör i Byggt teknik - Väg och Trafik teknik vid Lunds Tekniska Högskola, Campus Helsingborg, Lunds universitet. Arbetet motsvarar 22,5 HP och genomfördes i nära samarbete med NCC Industry, division asphalt, Upplands Väsby utifrån deras önskemål att studera hur tallbecksoljan påverkar asfaltens egenskaper.

Jag vill börja med att tacka mina handledare på NCC Robert Lundström och Jonas Ekblad för god vägledning arbetet igenom och nyttiga diskussioner. Ett stort tack vill jag också rikta till Hassan Hakim och övrig laborationspersonal på NCC:s väglaboratorium i Upplands Väsby för stort engagemang och god hjälp vid tillverkning och testning.

Jag vill också passa på att tacka min handledare från Lunds universitet Pajtim Sulejmani för bra feedback arbetet igenom och stort stöd vid dispositionen av rapporten.

Avslutningsvis vill jag passa på att tacka min examinator Sven Agardh för god hjälp i arbetets slutskeden.

Sammanfattning

Byggsektorn och asfaltbranschen behöver ta ytterligare steg mot mer hållbar och klimatsmart produktion. Det behövs b.l.a. utvecklas nya fossilfria förnyelsebara asfaltsprodukter. Ett av de viktigaste områdena är att ersätta råoljan som används för att tillverka det bituminösa bindemedlet.

Syftet med denna studie är att undersöka om man kan ersätta bitumen med den biobaserade produkten tallbecksolja. Studien undersöker hur asfaltens styvhets- och deformationsegenskaper påverkas av att delvis ersätta bitumen med tallbecksolja.

Provningsen utfördes på fyra olika asfaltmassor med en och samma stenstorleksfördelning och bindemedelsstyvhets, där referensbindemedlet 160/220 jämfördes med prover innehållande 5 %, 10 % och 15 % tallbecksolja i 100/150, 70/100 respektive 50/70 bitumen. De olika bindemedlens reologi karaktäriserades med penetration och mjukpunkt. De resulterande asfaltmassorna undersöktes med styvhetsmodul- och dynamisk krypprovning. Totalt laboratorietillverkades 12 provkroppar via marshallpackning, tre av varje asfaltstyp.

Resultaten från denna studie indikerar att tallbecksolja som tillsats i bitumen har likvärdiga egenskaper på asfaltmassans egenskaper som vanligt bitumen. Effekten av denna lägre viskositet hos tallbecksoljan på det färdiga bindemedlet kan bedömas i förhand med relativt hög precision. Både resultaten från styvhetsmodul- och dynamisk krypprovning tyder på att tallbecksoljan varken har negativ eller positiv påverkan på asfaltens egenskaper. Hållrumshalten påverkas inte heller av tallbecksoljan utan får ses som likvärdig i jämförelse med den konventionella ABT 11 160/220. De små skillnaderna i styvhets- och deformationsegenskaperna bedöms förklaras av skillnader i bindemedelsviskositet (penetrationsvärde). Mängden tallbecksolja verkar inte påverka asfaltens egenskaper annat än via det slutgiltiga bindemedlets penetration.

Summary

The entire construction sector, as well as the asphalt industry, needs to head towards a more sustainable and climate-smart approach, step by step. New fossil-free products and renewable alternatives in the asphalt industry need to be developed, the greatest focus being on the binder in an attempt to expose the crude oil in the amount that is possible.

The purpose of this study is to investigate whether you can put bitumen with bio-based products in the form tall oil pitch. What potential is there in the tall oil pitch an additive in the binder. The study will investigate how the properties of asphalt are affected by partially replacing bitumen from crude oil with tall oil pitch.

The literature study is the basis for the method that follows up from laboratory work in NCC Industry's road laboratory in Upplands Väsby. Four mixtures will be produced, where 5, 10 and 15% tall oil pitch will replace bitumen. Stiffness module and dynamic creep test will represent the functional test methods. Penetration and softening point will be tested on the binder. Four mixtures were laboratory made and 12 specimens were marshalled before testing.

The results of the study show that the tall oil pitch as an additive in the binder has equivalent properties to the properties of the asphalt mass. Both results on the stiffness module and dynamic creep test indicate that the tall oil pitch has no negative effect on the properties of the asphalt. The void content is also not affected by the tall oil pitch but can be seen as worthy in comparison with the conventional ABT 11 160/220. The amount of tall oil pitch also does not affect the properties of the asphalt according to the results if equivalent penetration is achieved.

Innehållsförteckning

1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställning	2
1.3 Metodbeskrivning	2
1.4 Avgränsningar	3
2 Litteraturstudie	4
2.1 Överbyggnaden och vägkroppen	4
2.2 Asfalt	5
2.2.1 Krav på sammansättning och funktion	7
2.2.2 Bindemedel	9
2.2.2.1 Bitumen	10
2.2.2.2 Destillation från råolja	10
2.3 Hållbarhet	11
2.3.1 Livscykelanalys (LCA)	12
2.3.2 Miljövarudeklaration (EPD)	13
2.3.3 Kolsänka	14
2.3.4 GWP klimatpåverkan	15
2.4 Biobindemedel	16
2.4.1 Råtallolja och bioraffinaderi	16
2.5 Förnybara material från skogen för asfalttillverkning	18
2.5.1 Lignin	19
2.5.2 Tallbecksolja	19
2.5.2.1 Tallbecksolja som ersättning för bitumen i asfalt	20
2.6 Deformation	21
2.6.1 Asfalts mekaniska egenskaper	21
2.6.2 Deformationsresistans	23
2.6.3 Asfaltens egenskaper för att undvika deformation	24
2.7 Mätmetoder bitumen och asfalt	24
2.7.1 Konventionell testning bitumen	24
2.7.1.1 Mjukpunkt	24
2.7.1.2 Penetration	25
2.7.2 Funktionella mätmetoder	26
2.7.2.1 Dynamiskt kryptest	26
2.7.2.2 Styvhetsmoduler Pulserande Indirekt draghållfasthetstest	28
2.7.2.3 Skrymdensitet	32
2.7.2.4 Kompaktdensitet	32
2.7.2.5 Hålrums halt	33
3 Utförda undersökningar	34
3.1 Proportionering	34

3.2 Bindemedelshalt	35
3.3 Penetration och mjukpunkt	35
3.4 Blandning av asfaltsmassa ABT 11	37
3.5 Marshallpackning	38
3.6 Skrymdensitet	39
3.7 Styvhetsmodul	39
3.8 Dynamiskt kryptest	40
3.9 Kompaktdensitet	41
4 Resultat	44
4.1 Penetration och mjukpunkt	44
4.2 Hålrums halt	44
4.3 Styvhetsmodul	45
4.4 Deformationsresistens	47
5 Diskussion och slutsats	51
5.1 Resultatdiskussion	51
5.2 Metoddiskussion	54
5.3 Slutsatser	57
5.4 Vidare studier	57
6 Referenser	58
7 Bilagor	62
7.1 Bilaga 1 Bindemedelshalt, minimum i viktprocent	62
7.2 Bilaga 2 Andel passerande i viktprocent	62
7.3 Bilaga 3 Hålrumsintervall Marshall (Vol-% Min – Max)	62
7.4 Bilaga 4 Penetrationstest	63
7.5 Bilaga 5 Skrymdensitet	63
7.6 Bilaga 6 Kompaktdensitet	63
7.7 Bilaga 7 Dynamiskt kryptest	64
7.8 Bilaga 8 Styvhetsmodul	65

1 Inledning

En av dagens största samhällsfrågor är den negativa klimatutvecklingen runt om i världen, där fokus under än längre tid legat på att minska koldioxidutsläppen och ta fram fossilfria bränslen och material. Hållbarhet är en viktig fråga i hela byggsektorn och inte minst inom asfaltsproduktionen. Utvecklingen har gått snabbt framåt det senaste decenniet där stort fokus har legat på fossilfria bränslen vid uppvärmningen av asfaltverk och återvinning av asfalt. Ersättning av fossilt bitumen med biobaserade bindemedel kan vara nästa steg i utvecklingen för en hållbar och klimatsmart asfaltsindustri. I den här studien undersöks möjligheterna att delvis ersätta bitumen med biobaserad tallbecksolja.

1.1 Bakgrund

I Sverige asfalterades den första vägen i Gamla stan i Stockholm år 1876. I början av 1900-talet startade en stor utbyggnad av det svenska vägnätet och det fortsatte i högt tempo fram till andra världskriget då Sverige drabbades av brist på bindemedel och utvecklingen avtog något (Fröberg och Strömberg, 1995).

I Sverige har det under de senaste åren tillverkats och lagt ut mellan 5 och 7 miljoner ton asfalt per år, vilket är ett ungefärligt medelvärde i Europa på antal utlagda ton. Idag används en överväldigande del av det tillverkade bituminet som bindemedel i asfalt men längre tillbaka i tiden användes det även till sammanfogning av sten, trä i byggnadskonstruktioner och tegel.

I mitten av 1900-talet blev stenkolstjära populärt att använda i bindemedel i asfalt men förbjöds år 1970 på grund av hälsorisker (Fröberg m.fl. 1999).

Det ställs höga krav på den tekniska kvaliteten hos vägars strukturella uppbyggnad och enskilda materiallager och tillsatser för att klara avsedd livslängd och funktion (Trafikverket 2021). Arbetsmiljö är viktigt i hela byggbranschen och inte minst inom asfalt, både vid asfalttillverkning och utläggning, det gäller både olycksrisker på arbetsplatsen och långsiktiga hälsorisker (SBUF, 2001).

Råolja är ett icke förnyelsebart ämne där processen från utvinning till användning utsätter klimatet för stora koldioxidutsläpp och är något som måste begränsas. Biobaserade ämnen i form av restprodukter från skogen och pappersindustrin som råttolja är förnyelsebara. Råttoljan kan liksom råoljan destilleras och bilda ett ämne som heter tallbecksolja vilket idag främst används som eldningsolja i t.ex. värmeverk. Det finns dock andra potentiella avsättningar, t.ex. som tillsats i bituminöst bindemedel (Kättström, 2019). Det har tidigare undersökts andra biobaserade alternativ i bindemedlet och asfalten som t.ex. matolja, vegetabiliska biooljor, biooljor av animaliskt ursprung och även fasta material som lignin.

För att vi ska kunna klara framtidens hållbarhetskrav så kommer det inte bara krävas ett alternativ till bitumen utan att detta alternativ också är tillräckligt hållbart, kostnadseffektivt och av tillräckligt hög teknisk kvalitet. Detta examensarbete kommer fokusera på tallbecksolja och dess inverkan på asfaltens tekniska kvalitet, dvs hur tallbecksoljan påverkar asfaltmassans väsentligaste fysiska egenskaper.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med studien är att öka förståelsen för hur tallbecksolja som ersättning av bitumen påverkar asfaltens egenskaper. Följande frågeställningar kommer att tas upp:

- Hur påverkas asfaltens egenskaper av att delvis ersätta bitumen med tallbecksolja.
- Vad blir effekterna av tallbecksolja på asfaltens styvhetsegenskaper.
- Hur påverkar tallbecksolja asfaltens deformationsegenskaper.
- Hur stor del av bindemedlet kan man ersätta med tallbecksolja för att inte påverka kvaliteten på asfaltmassan utifrån Trafikverkets kravställning på styvhetsmodul och dynamisk krypstabilitet.

1.3 Metodbeskrivning

Arbetet inleds med en litteraturstudie för hur kvalitet, miljö och hållbarhet hänger ihop med bindemedel och asfalt, samt hur asfaltens egenskaper är kopplade till deformation och styvhet. Teorin bakom funktionell testning av asfalt tas också upp i litteraturstudien. Studien omfattar laboratorieprovning för att utreda kvaliteten på asfaltsmassa innehållande olika andelar tallbecksolja. Bindemedelsprovningen på bindemedel är begränsad till penetration (standard SS-EN 1426) och mjukpunkt (kula och ring – SS-EN 1427). Därefter utförs tester på styvhetsmodul (SS-EN 12697–26) och dynamisk krypprovning (SS-EN 12697–25) på asfaltmassor. Eftersom hålrumshalt har relativt stor påverkan på asfalts mekaniska egenskaper kommer stryp- och

kompaktdensitetsprovning att utföras för att kontrollera hålrums halten i de olika provkropparna.

Tidigare forskning har visat att tallbecksolja har lägre viskositet än bitumen och att ersättning av bitumen med 5 % tallbecksolja medför en förändring i viskositet motsvarande en penetrationsklass för det resulterande bindemedlet (Ingrassia, 2020). Andelen tallbecksolja har valts utifrån att erhålla en liknande viskositet för hela provserien. 3 provkroppar per blandning (4 blandningar) tillverkas med olika bindemedel med olika mängd tallbecksolja men lika penetration (160/220).

4 provserier med 4 olika bindemedel:

- 160/220
- 100/150 + 5% tallbecksolja
- 70/100 + 10% tallbecksolja
- 50/70 + 15% tallbecksolja

Tallbecksoljan som använts kommer från Kraton Chemicals. Kraton Chemical (Arizona chemical) är ett internationellt företag som förädlar råtallolja till bland annat tallbecksolja genom fabriker runt om i Europa och USA. I Sverige finns det en produktionsanläggning placerad i Sandarne utanför Söderhamn, där den här studiens tallbecksolja är tagen. Tallbecksoljan har en deklarerad viskositet på 1173 mPas.

1.4 Avgränsningar

I den här studien kommer fokus ligga på teknisk kvalitet och funktionsrelaterade egenskaper hos en given asfaltsmassa (ABT 11) vid olika halter tallbecksolja men med samma penetrationsvärde hos det färdiga bindemedlet. Konventionella tester i form av mjukpunkt och penetration hos bindemedlet kommer dock göras. Funktionsrelaterade testmetoder på asfaltens styvhetsmoduler och deformationsegenskaper kommer göras men avgränsas till att köras med endast en temperatur. Provkropparna kommer tillverkas genom marshallstampning med en diameter på 101 mm i stället för 150 mm som metoden säger, anledningen är att både styvhetsmodul och dynamisk krypprovning ska kunnat köras på samma provkropp.

2 Litteraturstudie

Litteraturstudien omfattar dimensionering och funktion hos asfalt och bindemedel samt aspekter ur ett hållbarhetsperspektiv.

2.1 Överbyggnaden och vägkroppen

En vägöverbyggnad byggs upp av flera lager av bundna och obundna materiallager-, (se Figur 1). En av överbyggnadens huvudsakliga uppgift är att samla upp belastningen från trafiken och fördela den nedåt i vägkroppen. Det ställs högst krav på de översta lagren som utsätts för den största belastningen. De översta lagren består ofta av 1–3 bitumenbundna lager i form av bitumenbundet bärlager, bindlager och slitlager. Längre ner i överbyggnaden hittar vi ofta obundet bärlager och förstärkningslager. Tjockleken på lagren varierar utifrån den trafikbelastning som vägen ska dimensioneras för (Agardh och Parhamifar, 2014).

Det är viktigt att överbyggnaden är dränerande och släpper igenom vatten, blir det vattensamlingar i överbyggnaden så ökar risken mycket för deformationer och minskad bärighet (Granhage, 2009).

Figur 1 visar ett exempel på en grusbitumenöverbyggnad. Att förtydliga är att vid högre trafikbelastning finns ofta ett bindlager mellan det bundna bärlagret och slitlagret (Trafikverket, 2021).



Figur 1: Typsektion av grusbitumenöverbyggnad (Trafikverket, 2021).

2.2 Asfalt

Asfalt består normalt av krossat stenmaterial i olika kornfraktioner inklusive filler, bitumen och tillsatsmedel. Det finns olika asfaltstyper med olika egenskaper och som väljs utifrån trafikbelastning, klimat och de egenskaper man vill att den ska ha som slutprodukt (Fröberg, m.fl. 1999).

I Sverige är ABT (asfaltbetong tät) den vanligaste asfaltstypen som slitlager. ABS (asfaltbetong stenrik) är en stenrik massa som använts vid hög trafikbelastning och har god slitstyrka. ABT är en tät massa med mindre hålrum och mer bindemedel än ABS, och använts på stadsgator, tätbebyggda områden, cykelbanor bland annat. På relativt högtrafikerade vägar används normalt ett bitumenbundet bindlager (ABb). Bindlager skall vara stabila och motverka permanenta deformationer och spårbildning i vägytan. I det Bitumenbundna bärlagret hittar vi AG (asfaltsgrus), vilket har en större kornfraktion och lägre halt bindemedel än slitlagren.

Trafikverket ställer krav på funktionella egenskaper hos en asfaltsmassa.

I Tabell 1 nedan ser vi funktionella egenskaper hos slitlager i förhållande till referensbeläggningen ABT (Trafikverket, 2011). Som man kan se i tabellen finns en mängd olika egenskaper som enskilda asfaltmaterial skall uppvisa, varav stabilitet och deformationsresistens utgör två av de viktigaste.

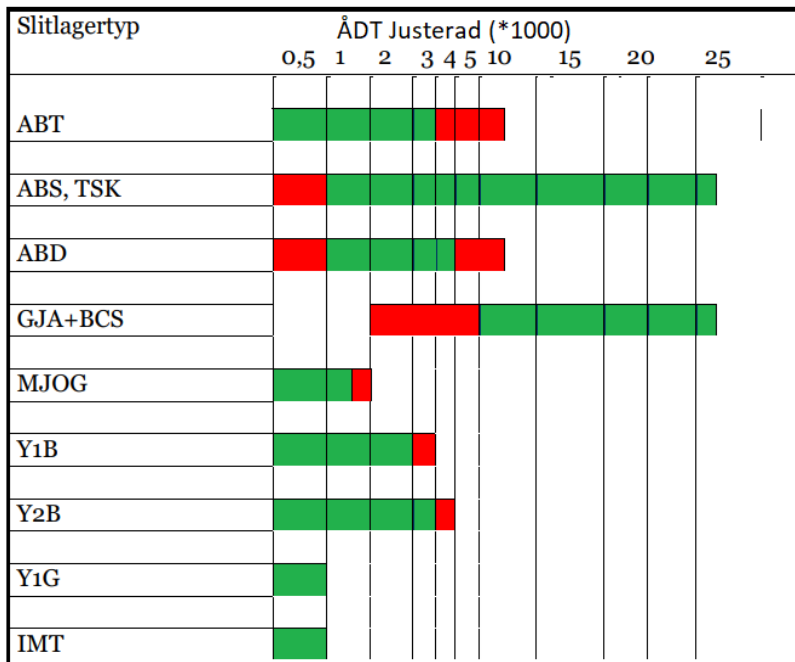
Tabell 1: Funktionella egenskaper (Trafikverket, 2011).

Egenskap	Slitlagertyp						
	ABS	TSK	PGJA+BCS	ÅAK, ÅAHV	MJOG	ABD	YB
Nötningsresistens	+	+	+	-	-	-	+
Deformationsresistens	+		=	-	-	=	
Styvhet	=		=	-	-	=	
Flexibilitet	=	+	=	+	+	-	+
Utmattningsmotstånd	=		=	+	+	=	
Vattenresistens	=	+	+	=	=	=	+
Täthet	=	=	+	-	-	-	+
Dränförmåga	=	=	=	=	=	+	=
Friktion	+	+	=	=	=	(+)	+
Bullerdämpning	-	(=)	(-)	=	=	+	-
Lågtemperaturegenskaper	=		=	+	+	=	=
Ljusreflexion	=	=	=	=	=	(+)	+

Benämningar:

+ bättre än ABT, - sämre än ABT, = likvärdig ABT, () osäker värdering jämfört med ABT.

Figur 2 beskriver val av slitlager med avseende på trafik där **grön** ifylld ruta avser rekommenderad användning och **röd** ifylld ruta motsvarar möjlig användning men ej rekommenderad i första hand.



Figur 2: Val av slitlager med avseende på trafikmängd (Trafikverket, 2011).

En asfaltsbeläggning består av mellan 93–96 % stenmaterial beroende på asfaltstyp. Stenmaterialet utvinns genom borrar och sprängning i bergtäkter oftast i det lokala området i närheten av ett asfaltverk. Transporterna till och från asfaltverket skiljer sig där av betydligt mellan ballast och bitumen, det krävs alltid längre transporter för bituminet medan stenmaterialet endast kan behöva fraktas några hundra meter från bergtäkten. På senare tid har större krav börjat ställas på kvaliteten på stenmaterialet främst på grund av stor inverkan av dubbslitage. Kornstorleksfördelningen är den viktigaste egenskapen och utgör den vanligaste och viktigaste provtagningsmetoden genom siktning (Agardh och Parhamifar, 2014).

Filler är ett stenmaterial som ingår i asfaltsmassan och har en kornfördelning <0,075 mm. Filler har i uppgift att få ner värdet på hålrumshalten om den visar sig vara icke önskvärd. En beläggning utan filler blir oftast känslig för deformationer, sprickor och risken för vattenintrång blir hög i och med lägre hålrums halt. Men för mycket filler kan också leda till att asfalten blir spröd och

svårjobbad vid utläggningsprocessen. Som tidigare uppgivits så har filler en stor effekt på hålrumshalten (Höbeda, 1994).

2.2.1 Krav på sammansättning och funktion

Trafikverket ställer krav gällande stenmaterialet och bindemedlet i beläggningen, i Tabell 2 ser vi kraven på kornstorleksfördelningen för ABT 11.

Tabell 2: Trafikverkets krav på kornstorleksfördelning ABT 11 (Trafikverket, 2021).

Andel passerande i viktprocent

Sikt (mm)	ABT 11
45	-
31,5	-
22,4	-
16	100
11,2	90–100
8	70–88
5,6	-
4	48–66
2	33–52
0,5	16–31
0,063	6–9

I Tabell 2 kan vi se att ABT 11 innehåller fraktioner mellan 11,2 och ner till filler. Fraktionerna är jämnt fördelad för att ge en så tät massa som möjligt.

I Tabell 3 framgår kraven på bindemedelshalt för ABT 11 för varje bindemedelstyp.

Tabell 3: Trafikverkets krav på bindemedelshalt ABT 11 (Trafikverket, 2021).

Bindemedelshalt, minimum i viktprocent.

Bindemedelstyp	Bindemedelshalt [%]
50/70	6,4
70/100	6,2
100/150	6,0
160/220	5,8
330/430	5,6

ABT 11 har ett minimumkrav på 5,8 % bindemedel i asfaltmassan för ett 160/220 – bitumen (Trafikverket, 2021). I Tabell 3 ser vi ett tydligt samband där hårdare bitumen med lägre penetration kräver högre bindemedelshalt. Ett hårdare bitumen är inte lika visköst och sprids inte ut lika bra i massan och därför både kan det tillföras och krävas mer bindemedel jämfört med ett bitumen med större penetrationsvärde.

Utöver sammansättningskraven ställer Trafikverket i vissa fall även krav på deformationsresistans (se Tabell 4). Som man kan se i tabellen baseras kravet på årsdyngtrafiken (ÅDT) av tung trafik, se Tabell 4.

Tabell 4: Trafikverkets krav på deformationsresistans slitlager (Trafikverket, 2014).

ÅDT tung	100–499	500–999	1000–1999	≥ 2000 (extrem last)
Max [μ Strain] på laboratoriepackad provkropp.	12 500	10 000	8 750	7 500

Trafikverket har angivna styvhetsmoduler som är avsedda och anpassade att användas vid dimensionering av vägöverbyggnad enligt Trafikverkets metod, DK2, vid nybyggnad, ombyggnad och underhållsåtgärder (Trafikverket, 2021). I Tabell 5 redovisas dessa Styvhetsmoduler vid olika årstider och olika klimatzoner.

Tabell 5: Styvhetsmoduler för bitumenbundet slitlager (Trafikverket, 2021).

Klimatzon	1	2	3	4	5
Vinter	14 500	14 500	15 500	17 000	18 500
Tjällossningsvinter	13 000	13 000			
Tjällossning	13 000	12 000	10 500	9 500	9 000
Senvår	11 000	11 500			
Sommar	3 500	4 000	4 500	4 000	4 500
Höst	9 000	11 000	11 000	11 000	11 500

Tabell 6: Styvhetsmoduler för olika temperaturer och trafik (Trafikverket, 2011).

Trafik	5 C°	10 C°	20 C°
Hög trafik (>1000 ÅDT tung)	<11 000	5500–9000	>1500
Mellantrafik (200–1000 ÅDT tung)	<11 000	4500–7000	>1500
Låg trafik (<200 ÅDT tung)	<9000	2200–7000	>1500

En ökad styvhet ökar risken för sprickbildning, en beläggning med låg styvhetsmodul har normalt bättre utmattningssegenskaper och risken för sprickbildning är mindre, däremot har den sämre lastfördelande förmåga. Det är viktigt att göra noggranna avvägningar för att uppnå bästa möjliga egenskaper under aktuella förhållanden, se Tabell 6 (Trafikverket, 2011).

2.2.2 Bindemedel

Bindemedel avser att hålla samman stenmaterialet i beläggningen. Runt 4–6 % av asfalt består av bindemedel beroende på asfaltstyp och vilka egenskaper man vill uppnå. Idag utgörs bindemedlet i asfalt av bitumen men tidigare har även naturasfalt, tjära, bitumenlösning, polymermodifierat bitumen och bitumenemulsion använts (Redelius, 1999).

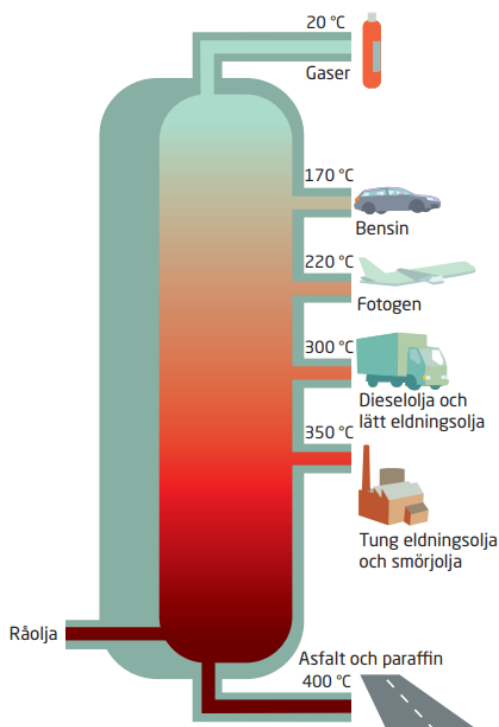
Längre tillbaka i historien har man likt som idag utvunnit bindemedel och bitumen från naturen. Europa hade gott om stenkol i början av 1800 talet, där av blev stenkolstjäran ett välkommet bitumen och användes långt in på 1900-talet. En mängd värdefulla produkter frigörs vid destillationen av stenkolstjäran, slutprodukten blev asfaltstjära, senare forskning klarlagde att ämnet fenoler som ingår i tjäran har cancerogena egenskaper. Vid upphettning i samband med utläggning frigjordes dessa ämnen och asfaltstjäran förbjöds på 1970-talet. Stenkolstjäran är viktig att känna till än idag eftersom den kan finnas kvar längre ner i asfaltslagrena och är p.g.a. arbetsmiljöproblem inte återvinningsbar i asfalt. Hälsorisker är en viktig aspekt vid framtagning av nya bindemedel och bitumen (Redelius, 1995).

2.2.2.1 Bitumen

Bitumen är en mörk halvfast/hård smältbar kolväteblandning som utvinns ur råolja och används som bindemedel i asfalt. Den totala produktionen av råolja i världen är 3000 miljoner ton, där 3% av detta utgör bitumen. Råolja destilleras i oljeraffinaderier till bitumen. Bitumen är ett viskoelastiskt material vilket innebär att det mjuknar vid högre temperaturer och styvnar vid lägre temperaturer. Detta innebär att asfaltsmassans mekaniska egenskaper påverkas av temperaturförändringar. Det finns ett flertal analysmetoder som brukar användas för att klassificera och kontrollera bitumens egenskaper, bland annat mjukpunkt, penetration, viskositet och flampunkt (Redelius, 1995).

2.2.2.2 Destillation från råolja

Bitumen är en produkt och utvinns från tunga råoljor. Olja destilleras och vid en hög temperatur (efter bensin och diesel) blir produkten bitumen, vid all förbränning av fossila bränslen sker stora koldioxidutsläpp, särskild vid framställning av bitumen då höga temperaturer krävs vid uppvärmningen (Whiteoak, 1990). I Figur 3 finns exempel på produkter som utvinns vid olika temperaturer.

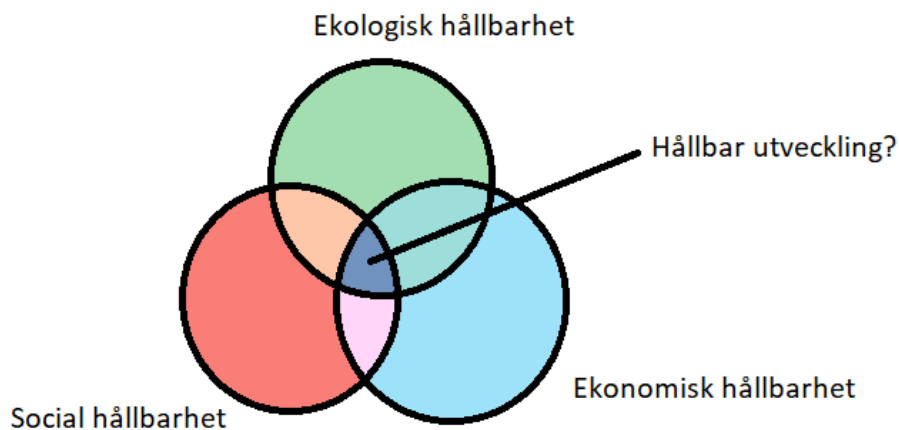


Figur 3: Destillation av råolja (Lemshaga, 2019).

I facket längst ner finns de fraktioner av tunga kolväten med höga kokpunkter. Vid ytterligare en destillation av de tunga kolvätena erhålls gasolja, destillat och rester med korta kolväten. Det är de korta kolvätena som används för att framställa olika bitumensorter. Som tidigare nämndes så varierar bitumens egenskaper på råoljans ursprung (Brown, 1990).

2.3 Hållbarhet

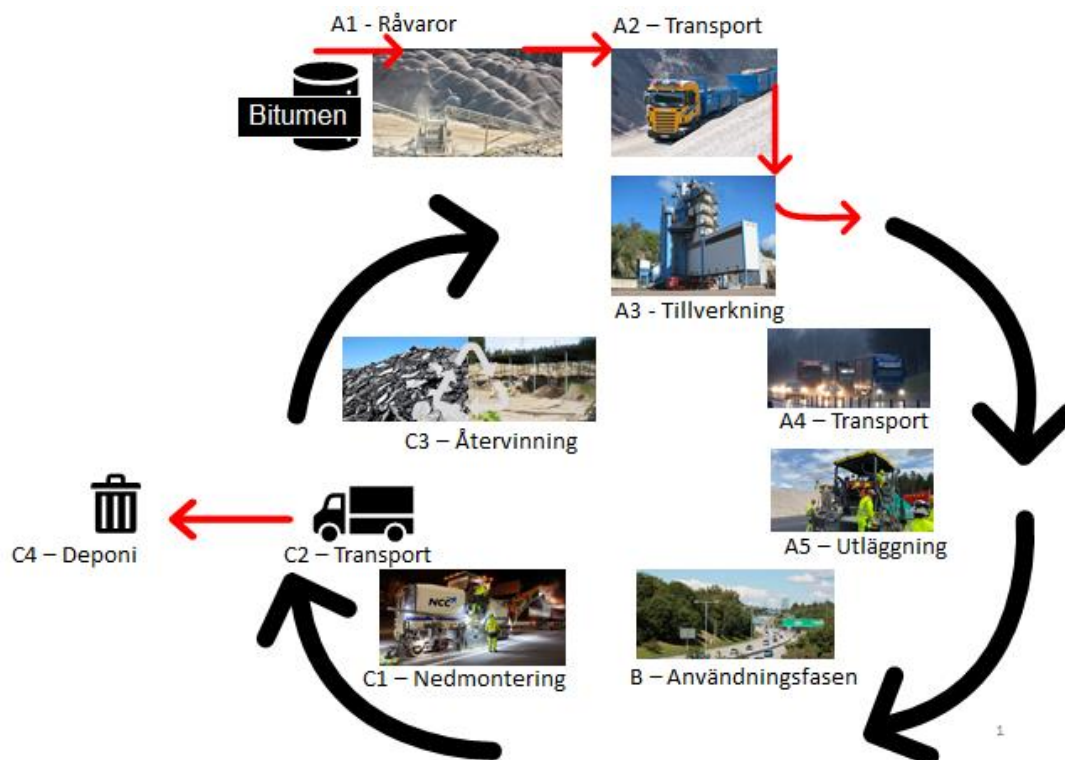
Hållbarhet eller hållbar utveckling är begrepp som definierar tillstånd respektive utveckling som tillgodoser dagens behov utan att äventyra kommande generationers behov och möjligheter att tillgodose sina behov. Hållbar utveckling brukar delas upp i tre sammanhängande dimensioner, social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet-, (se Figur 4) (Boverket, 2021).



Figur 4: Definition av hållbarhet (Boverket, 2021).

2.3.1 Livscykelanalys (LCA)

En livscykelanalys går ut på att beräkna miljöpåverkan för en produkts livscykel, ofta från att råvaran utvinns till det att produkten inte används längre och behöver tas om hand ("vaggan till graven"). Med en livscykelanalys kan man analysera under vilket skede en given produkt orsakar störst klimatpåverkan och via det resultatet förändra för att minska klimatpåverkan (Swedish standard institute, 2006). Figur 5 visar hur en livscykel ser ut för asfalt.



Figur 5: Livscykelanalys för asfalt (Löwhagen, 2022).

Livscykelanalysen för asfalt börjar med att insatsmaterial som bitumen och stenmaterialet utvinns. Därefter transporteras dessa för själva asfalttillverkningen. Dessa steg benämns ofta för vaggan till grind (A1-A3, se Figur 5). Därefter transporteras asfaltmassan till asfaltläggaren varefter asfalten läggs ut (A4 respektive A5). I Figur 5 indikeras livscykelns B-modul vilket motsvarar en användningsfas. Under denna fas trafikerar beläggningen och utsläpp av växthusgaser sker inte minst via beläggningsunderhåll. I detta fall innebär kortare livslängd för en given asfaltbeläggning ökat underhållsbehov, och därmed större klimatpåverkan. I C-modulen behandlas asfaltens nedmontering, återvinning och eventuell deponi. I det fall en

asfaltprodukt inte återvinns innebär större klimatpåverkan än om den kan återvinnas (Löwhagen, 2022).

I en LCA kan man välja vilka miljöindikatorer som ska analyseras för en given verksamhet, (Trafikverket, 2021) har listat följande indikatorer:

- Klimatpåverkan växthusgaser (GWP – global warming potential)
- Förurning (AP)
- Övergödning (EP)
- Utarmning av icke-fossila resurser (ADPe)
- Utarmning av fossila resurser (ADPf)
- Ozonnedbrytning (ODP)
- Marknära ozon (POCP)

2.3.2 Miljövarudeklaration (EPD)

Det är viktigt att data och resultat från en livscykelanalys är tillförlitligt och redovisade på ett standardiserat sätt (t.ex. baseras på vedertagna alternativt specifikt uppmätta data eller omfattar avsedda moduler i produktens livscykel). Med en miljövarudeklaration (EPD) kan en tillverkare av en viss produkt redovisa jämförbara, objektiva och tredjepartsverifierade data som visar miljöprestandan för produkten. Miljödeklarationer kan användas i upphandlingsprocesser där beställare kan jämföra entreprenörernas produkter utifrån ett hållbarhetsperspektiv och därmed tilldela entreprenadarbeten baserat på andra värden än rent monetära (mjuka parametrar, bonus/viten och inte enbart lägsta pris). Miljövarudeklarationen presenterar resultatet på livscykelanalysen på produkten samt allmän produktinformation och metod, vilket sedan verifieras av en godkänd oberoende part (Environdec, U.Å).

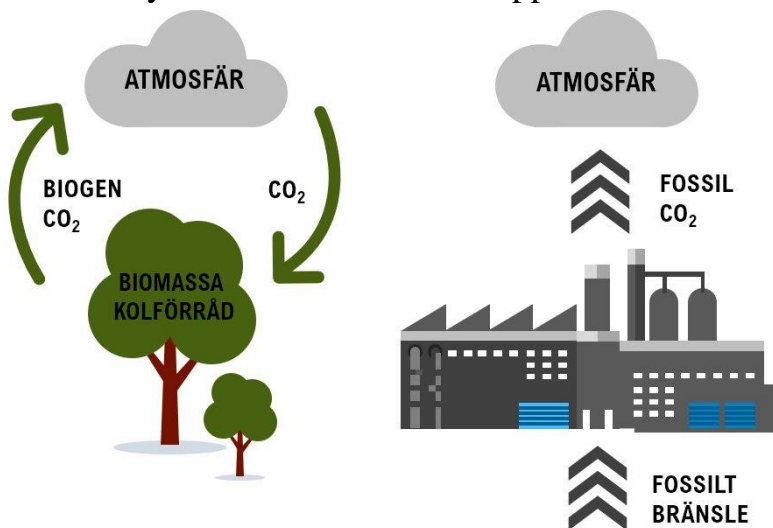
Miljöpåverkan för t.ex. två asfaltprodukter eller cementprodukter kan skilja sig väldigt mycket och därav används EPD för att få fram dessa skillnader och kunnat jämföra för och nackdelar hos produkten. Det finns regler och krav (PCR) som företag ska hålla sig inom vid framtagning av EPD för att de ska utgå från samma kriterier och lätt att jämföra resultaten hos produkterna (Trafikverket, 2021).

2.3.3 Kolsänka

Fossila bränslen har bildats från kolföreningar i form av växter och organismer som levde för miljoner år sedan. Dessa växter tog upp koldioxid från luften medan de levde. När dessa kolföreningar eldas upp och förenas med syre frigörs koldioxid i atmosfären. Genom vår utvinning och förbränning av fossila bränslen har nu atmosfären återfått de koldioxid som växterna tidigare tagit upp, idag släpps mer koldioxid ut än vad som tas upp vilket rubbar kolets kretslopp och växthusgaserna ökar i atmosfären (Naturvårdsverket, U.Å).

När koldioxid fångas upp från atmosfären och lagras i marken eller levande biomassor så uppstår kolsänkor. Över tid har lagringen av koldioxid i biomassa ökat då avverkningen och planteringen varit större än degraderingen av skog. Skogsprodukter har olika livslängd, trähus tex har en väldigt lång livslängd då det dröjer väldigt länge innan kolet återvänder till atmosfären. Papper och biobränslen har en kort livslängd och kolet återgår till atmosfären snabbt efter skörd eftersom kolföreningarna förbränns i pappersindustrin.

Koldioxidlagring i forma av kolsänkor bidrar till minskade utsläpp. Biogena koldioxidutsläpp brukar registreras som nollutsläpp och klimatneutralt, eftersom nerhuggna träd ersätts av nya efter skörd, detta gör att ett cirkulärt system för biogena kol kan bildas. Det som släpps ut vid förbränningen kan hela tiden bindas till ny biomassa. I Figur 6 visas skillnaden mellan ett biogent cirkulärt system för koldioxidutsläpp och fossila koldioxidutsläpp.



Figur 6: Skillnaden mellan biogena koldioxidutsläpp och fossila koldioxidutsläpp (Naturvårdsverket, U.Å).

Det finns vissa krav som biomassan måste uppfylla för att vara hållbara ur ett klimatperspektiv och inte ge några nettoutsläpp av koldioxid vid förbränningen. Dessa krav står listade:

- Uttaget av biomassa får inte överstiga tillväxten.
- Återplantering av trä och växter som binder koldioxid ska ske.
- Kolförrådet får inte minska i mark och växter på lång sikt i det större området där biomassan utvinns.
- Fossila bränslen ska inte användas för utvinning, transport eller omvandling av biomassan. (Naturvårdsverket, U.Å).

Nettoutsläpp och nettoupptag av koldioxid som sker ska enligt klimatkonventionen följas upp i växthusgasstatistiken för markanvändningssektorn (LULUCF) i det land där biomassan produceras. Om uttaget av biomassa från skogen är större än tillväxten så redovisas det i statistiken för markanvändningssektorn, vilket innebär att kolsänkorna i levande träd och växter minskar i med att uttaget är högre än tillväxten och inte längre klimatneutraliserat. Om så är fallet redovisas ett växthusgasutsläpp (Naturvårdsverket, U.Å).

2.3.4 GWP klimatpåverkan

År 2020 gjordes det en livscykelanalys av Kraton Chemical där man kollade på den Globala uppvärmningspotentialen (GWP) vilket är ett mått på koldioxidutsläppens påverkan på den globala uppvärmningen (Porot och Haslam, 2020).

Studien har gjorts med hänsyn till plantering av träd, skörden, pappersbruksprocessen där man utvunnit råtalolja och slutligen destillationen till tallbecksolja (TOP). Skog och växter tar hela tiden upp koldioxid från luften och binder vilket påverkar GWP (Global Warming Potential), detta anser Kraton vara en viktig parameter i skillnaden mellan råolja och tallbecksolja i bindemedlet.

Molekyförhållandena mellan CO₂ och C gör att 1 kg TOP binder cirka 2,8 kg CO₂ när skogen växer och binder koldioxid (Porot och Haslam 2020). Detta har Kraton räknat som -2,780 kg/CO₂eq/ton. Kraton räknar alltså att det biogena kolet förblir kvar i Asfalten och utgör en kolsänka i framtiden. Utsläppen vid råvarutillverkningen av tallbecksolja (odling, skörd, bearbetning, tillverkning, transporter) uppgår till 0,6kg/CO₂eq/ton vilket gör att den totala GWPn resulterade i – 2,180 kgCO₂eq/ton (Porot och Haslam, 2020).

Liknande livscykelanalys med bitumen av råolja har gjorts och visat en högre global uppvärmningspotential. Det har gjorts en del undersökningar av olika

bitumenleverantörer, Eurobitume gjorde en livscykelanalys på bitumen som produceras i Europa och kom fram till ett GWP-värde på 147 kgCO₂eq/ton, dvs av 1 ton bitumen släpps 147kg CO₂ ut. Detta värde kan skilja beroende på råolja-källa, utvinning osv. (Distribution från tillverkningsplats till asfaltverk ej medräknat) (Porot och Haslam, 2020).

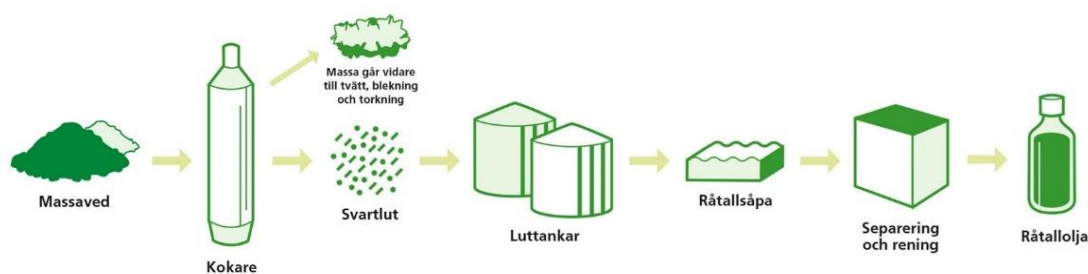
2.4 Biobindemedel

Hela byggsektorn har en betydande orsak till den negativa miljöpåverkan, eftersom bl.a. förbrukningen av icke förnybara resurser som bränslen och material är vanligt och avfallshanteringen är begränsad. Vägsektorn försöker gå mot ”grönare” alternativ och hållbara lösningar i form av en god avfallshandling där företagen försöker maximera användningen av återvunna material. Uppvärmningen i asfaltverken är på bra väg att bli helt fossilfri. Även biobindemedel har börjat undersökas allt mer, där företagen försöker ta fram förnybara material i form av biomaterial som delvis ska kunna ersätta bitumen (Ingrassia, 2020).

2.4.1 Råtalolja och bioraffinaderi

I Sverige tillverkas ca 280 000 ton råtalolja varje år. (Arizona Chemicals, 2017). Ett relativt stort massabruk inom skogsindustrin kan producera mer än 1 miljon ton pappersamma per år vilket i sin tur genererar mellan 50 och 60 000 ton råtalolja (Södra, 2021).

Efter kokprocessen där vatten blir till massa och till slut papper så förs den använda kokvätskan (svartluten) till kemikalieåtervinning. Det finns extraktivämne i processen som separerats från vatten och bildat såpa, det kan i sin tur avskiljas från svartluten i luttankar. För att såpan ska kunna återgå till organiska syror så behandlas den med syra och den organiska produkten som framställts då kallas råtalolja. Figur 7 illustrerar en översiktlig bild för hur processen går till (Södra, 2021).



Figur 7: Tallojprocessen från massaved till råtalolja (Södra, 2021).

Råtallsåpan kan avskiljs från svartlutet i luttankarna och sedan via separering och rening utvinna råtalolja. Produkten råtalolja kan konceptuellt sägas motsvara den råolja som erhålls ur naturen och som sedan kan processa i raffinaderi till olika bränslen och material.

Biomassa är en förnybar energikälla från skogen, vid förbränning av biomassa släpper den endast ut den halt som den själv har tagit upp under tillväxten. Detta gör att det inte sker något nettotillskott av koldioxid i atmosfären vid förbränning av biomassa (Swedegas, 2018).

Begreppet biomassa innefattar förutom biogas och biometan även rester från skogsindustrin samt längre fram i processen från pappersindustrin osv. I ett bioraffinaderi finns möjligheterna att ta vara på restprodukter från skogsindustrin, vilket vi har varit inne på tidigare med utvinning av råtalolja från sulfatprocessen i massabruken. Biomassa utgör på det här sättet ett kretslopp vilket inte fossila energikällor gör. Biomassan förädlas till olika produkter i ett bioraffinaderi genom förbränning. Målet är att nyttja biobaserade resurser så effektivt som möjligt och samtidigt utveckla gröna produkter som tidigare varit fossila (Mossberg, U.Å).

SCA som är en stor papperstillverkare planerar att anlägga ett bioraffinaderi i närheten av sin industri utanför Sundsvall. SCA kommer använda svartlutet från sin råvara som innehåller mycket av en annan produkt som ansetts kunna användas i asfalt: lignin (se avsnitt 2.4.3 nedan). Ligninet i svartluten förädlas till ligninolja som sedan vidareförädlas till bland annat bensin och diesel. Detta är ett liknande exempel på hur tallbecksolja utvinns och förädlas i Sandarne (SCA, U.Å).

synvinkel så bör det förnybara materialet finnas i stora mängder och vara lättillgängligt och inte kräva ytterligare ansträngningar jämfört med konventionella material.

Ingrassia (2020) hävdar att det förnybara materialet bör väljas ut med tanke på de lokala förutsättningarna för utvinning för att undvika längre lagringsperioder och långa transporter. Ett biobindemedel som innehåller ett förnybart material bör inte drabbas av kemiska förändringar under lagringstiden för att minska risken för oönskade egenskaper. Slutligen att understryka som ett grundläggande mål är att det förnybara materialet bör vara någon trögflytande vätska med bindande egenskaper, så vidhäftning kan säkerställas i bitumenblandningen (Ingrassia, 2020).

2.5.1 Lignin

Cellulosa, hemicellulosa och lignin är de 3 huvudmaterialen i trädstammen där lignin utgör ca 15–20%. Lignin fungerar som ett naturligt lim för att hålla ihop Cellulosan och hemicellulosan i trädstammen, det ger även extra styrka till trädstammen. Forskare har genom åren försökt fastslå den kemiska strukturen hos lignin men det har visat sig att det förekommer olika kemiska strukturer.

Utvinningen av lignin sker på fler sätt men oftast ihop med massatillverkning, där ligninet tas fram genom kemiska metoder för att frilägga fibrerna från veden. Lignin är ett biomaterial som har potential att kunna ersätta fossila bränslen hos industrier i framtiden (Imeri och Maka, 2021). Idag används det mesta ligninet som energikälla i massaverken, men utvecklingen har gått framåt och nu undersöks hur lignin kan ersätta råoljan i bitumen (Novotny, 2020).

2.5.2 Tallbecksolja

Tallbecksoljan är tillsammans med tallfettsyra och hartsyra de tre produkterna man förädlar från råtalloljan. Hartsyran används som råvara till tryckpapper, bindemedel i tryckfärg och tejp. Tallfettsyran används också i huvudsak till färg och tryckpapper. Av råtalloljan som utvinns så är det ca 40% som förädlas till tallbecksolja och används idag främst för att ersätta fossil eldningsolja (Olsson, 2012). Historiskt har eldningsolja varit det vanligaste bränslet i asfaltverk.

Tallbecksolja är en brun trögflytande vätska med en stark stickande lukt och har likt den fossila eldningsoljan hög energitäthet och homogenitet. Tallbecksoljan innehåller inte sällan restprodukter som fiber och aska vilket är något industrierna måste ta stor hänsyn till vid förbränning. Svavelhalten är högre i jämförelse med både E05 (fossil eldningsolja) och andra biooljor vilket gör att

svaveldioxidutsläppen vid förbränning av tallbeckolja är högre än för eldningsolja. Tallbecksoljan är också frätande vid högre temperaturer. Askhalten är också högre för tallbeckolja än fossil eldningsolja vilket innebär att halten slagg som blir kvar efter förbränning av tallbeckolja är högre än för eldningsolja. I Tabell 7 ges fler exempel på egenskapsskillnaderna mellan tallbeckolja och eldningsolja (Kvarnström, 2009).

Tabell 7: Egenskapsskillnad mellan Tallbeckolja och Eldningsolja (Kvarnström, 2009).

Parametrar	Tallbeckolja	Eldningsolja
Värmevärde (MJ/kg)	38	41,5
Svavelhalt (viktprocent)	0,27	<0,5
Viskositet 50 °C (mm ² /s)	110	-
Viskositet 80 °C (mm ² /s)	50	30–50
Flampunkt (°C)	130	>100
Askhalt (viktprocent)	0,26	0,04

2.5.2.1 Tallbeckolja som ersättning för bitumen i asfalt

Det har tidigare gjorts forskning på biobindemedel där bioolja har varit tillsatt i bindemedlet. Ingrassia (2020) undersökte bindemedlets egenskaper med en viss halt bioolja och med vanligt bitumen och sedan jämförts. Studien visade att 10% bioolja i bindemedlet hade positiva effekter på bindemedlets åldringsbeständighet, när biohalten ökade så minskade åldringsbeständigheten i jämförelse med ett konventionellt bitumen vid lika penetration. Dessutom så visade det sig att i prestandasynvinkel inte ha några skillnader jämfört med det konventionella bituminet, tester på permanent deformation och utmattningsmotstånd gjordes. Biobindemedlet visade sig ha jämförbara eller till och med bättre hållbarhet och långtidsprestanda än det konventionella bituminet (Ingrassia, 2020).

I studien undersöktes även hur biobindemedlet reagerar med vatten. Den italienska doktoranden kom fram till att vattnet hade mindre skadlig effekt på bindningsstyrkan hos bindemedlet jämfört med det konventionella bituminet. Biooljan visade sig ha bättre bindningsstyrka mellan bitumen och kieselaggregat i närvaro av vatten. Ett biobindemedel kan förbättra motståndskraften mot vatten och fuktskador (Ingrassia, 2020).

Studien syftade också till att studera biobindemedlets egenskaper utifrån återvinningssynpunkt. Användningen av biobindemedel i varm återvinning av återvunnen asfalt såväl som varm återvinning av återvunnen bioasfalt kan leda till blandningar som är mindre mottagliga för sprickbildning, vilket är tack vare

de positiva egenskaperna hos biobindemedlets åldringsbeständighet. Biobindemedlet är 100% återvinningsbart och effektivt vid varm återvinning av typisk återvunnen asfalt (Ingrassia, 2020).

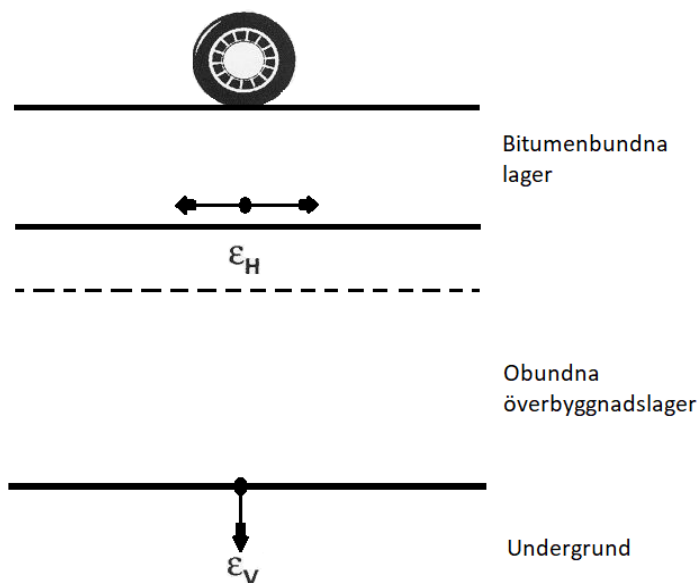
Ingrassia (2020) studerade också hur viskoelastiska egenskaper och utmattningsbeteende påverkades av bioolja. Både konventionella blandningar och bioblandningar utsattes för komplexa modultester och cykliska utmattningstester. Man kom fram till att bioasfalten under jungfruliga förhållanden kunde vara något styvare och mer benägen för utmattningssprickor än den konventionella blandningen vilket hade att göra med en eventuell överåldring vid blandningen och packningen på labbet. Däremot verkar bioasfaltsblandningen ha potentiella fördelar på utmattningsprestandan på lång sikt efter åldrande i jämförelse med den ”vanliga” asfaltsblandningen.

Sammanfattningsvis av undersökningarna som gjorts i den här forskningsstudien kan man se på stora fördelar med bioolja som tillsats i bindemedlet, både i hänsyn till åldring, vattenkänslighet, utmattning och återvinning (Ingrassia, 2020).

2.6 Deformation

2.6.1 Asfalts mekaniska egenskaper

Asfalts mekaniska egenskaper beskrivs ofta i form av spänningar och töjningar. I väggroppen finns det punkter som är särskild kritiska för bärigheten hos hela väggkonstruktionen vilket Figur 9 visar.



Figur 9: Dragtöjningar i väggroppen (Jansson och Said, 2001).

Det är den vertikala trycktöjningen i undergrunden och den horisontella dragtöjningen i underkant asfaltslagret som har störst påverkan på vägens stabilitet.

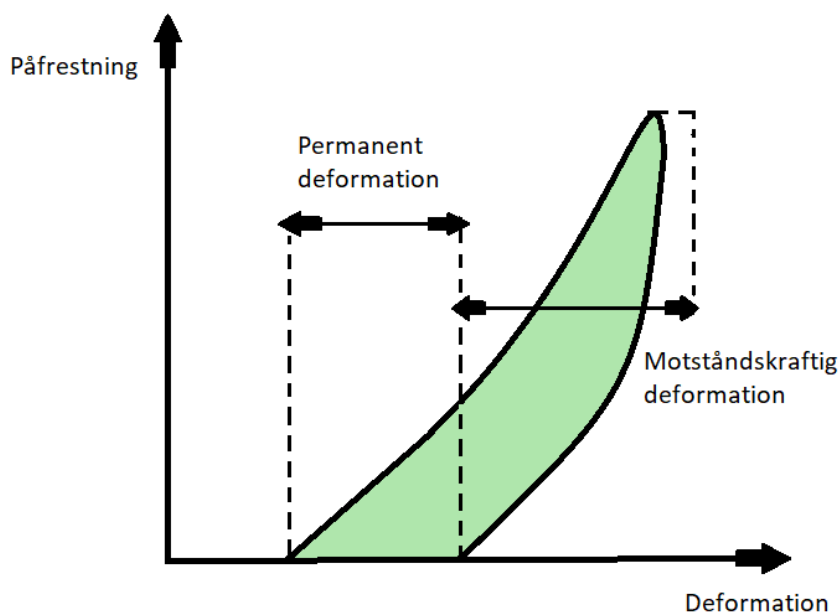
Dessa mekaniska egenskaper kan beskrivas genom parametrar som elastisk styvhet (E-modul) och tvärkontraktion där Poisson's tal används, Poissons tal skiftar inte särskild mycket beroende på material och sätts ofta till 0,35. E – modulen eller styvhetsmodulen är ett mått på styvheten hos ett material, ett styvt material har högre Elasticitetsmodul än ett mjukt. E-modulen för asfalt är temperaturberoende och bestäms framför allt utifrån hur styvheten på bindemedlet förändras med temperaturen. Vid dimensionering av de vanligaste beläggningstyperna används ofta ett samband mellan E-modulen och temperaturen (Jansson och Said, 2001).

Kingham uttryckte sambandet mellan töjning och antal belastningar till deformation på formen:

$$\log \epsilon = a + b \cdot \log E + c \cdot \log N_f + d \cdot \log N_f(2)$$

ϵ = Horisontell dragtöjning i beläggningens underkant N_f = Antal belastningar till skada E = Beläggningens styvhetsmodul a , b , c och d är konstanter (Jansson och Said, 2001).

I Figur 10 ser vi ett koordinatsystem för hur asfalt deformeras, spänningen är på y-axeln och töjningen på x-axeln. Asfalt är inte linjärt elastiskt utan deformeras på ett annorlunda sätt (Agardh, 2021).



Figur 10: Asfalts oelastiska deformation (Agardh, 2021).

Ett linjärt elastiskt material hade fått en rät linje där spänningen och töjningen beror linjärt med varandra men asfalt är ett trögt ämne och följer inte sambandet vilket Figur 10 visar. Vi kan se att asfalten inte ”reagerar” direkt lasten släpper, utan det dröjer ett tag innan den återhämtat sig och kommer inte tillbaka dit den starta och en deformation har bildats (Permanent strain) (Agardh, 2021).

2.6.2 Deformationsresistans

En vägbeläggnings deformationsresistans fungerar som ett mått på asfaltens duglighet att motstå permanenta deformationer i asfaltslagret. Permanent deformation hos asfalt uppstår när ett material under belastning omlagras (kemisk reaktion uppstår där molekyler byter plats). Spårbildning bildas i lastzonen där bilarna belastar vägen och valkning uppstår på vardera sida om spåret. Oftast så bildas spåren genom den tunga trafikens inverkan under varmare perioder. Beläggningsen är mest utsatt för spår och valkbindning där tung linjetrafik går under varma perioder samt vid trafikljus där asfaltslagren får utstå stora påkänningar. Man kan visa genom strukturell analys att de största deformationerna och påkänningarna uppstår i lagret under slitlagret, dvs i bindlagret, bitumenbundna bärlagret eller direkt på bärlagret om det endast är ett lager asfalt. För att öka stabiliteten på vägen dimensioneras vägar med hög andel tung trafik oftast med ett bindlager med god deformationsresistans. I Tabell 8 finns faktorer som påverkar deformationsresistansen positivt (Trafikverket, 2014).

Tabell 8: Påverkande faktorer på deformationsresistansen i asfalt (Trafikverket, 2014).

Variabler	Deformationsresistansen förbättras
Stenmaterial	Naturgrus => Helkrossat Rundkornigt => Kubiskt => Flisigt Större maxstorlek på stenarna Hålrums i stenskelettet 13 - 17% (ej under 13%)
Bindemedel	Låg styvhet => hög styvhet Hög bitumenhalt => låg bitumenhalt
Massabeläggning	Hålrums halt = 4% (ej under 3%) Bitumenfyllt hålrums <80% Filler + bitumenfyllt hålrums <85% Filler/bitumen vikt-% = 1,2 Mörk massa => ljus massa/ljus sten (i vägytan)

Deformationsresistansen går att mäta från laborietillverkade eller uppborrade provkroppar från beläggningen genom dynamiskt kryptest (Trafikverket, 2014).

2.6.3 Asfaltens egenskaper för att undvika deformation

Bindemedelstyp och bindemedelshalt har störst betydelse för asfaltens deformation. Bindemedelshalten bör vara relativt låg för att ha minskad risk för deformation, men till en viss nivå, blir bindemedelshalten allt för låg kommer det bidra till deformationer, se Tabell 8. Bindemedelstypen ska vara något hårdare för att minska risken för deformation i jämförelse med bindemedelstyper för att minska risken för sprickbildning, där mjukare bindemedel vanligtvis rekommenderas så asfalten kan ”röra sig” lättare. Ett bindemedel med högre penetration är där av oftast att rekommendera. Det går också att undvika deformationer genom att ha så hög densitet som möjligt hos stenmaterialet i kornkurvan (Agardh, 2021).

2.7 Mätmetoder bitumen och asfalt

2.7.1 Konventionell testning bitumen

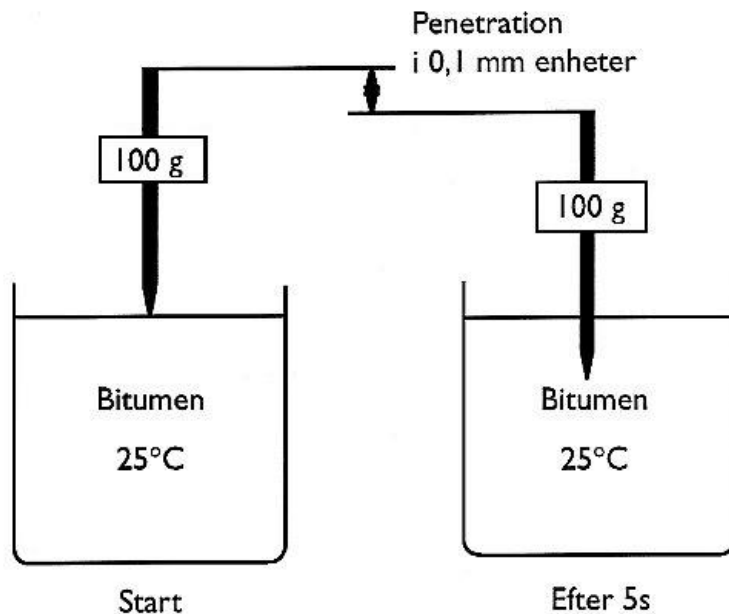
De europeiska klassade mätmetoderna för bitumens egenskaper är mjukpunktstest, penetrationstest, Fraas brytpunkt, kinematisk viskositet, dynamisk viskositet, komplex skjuvmodul och fasvinkel, MSCR test, och BBR test (Eurobitume, U.Å.).

2.7.1.1 Mjukpunkt

Mjukpunkt är ett temperaturvärde för bitumen likt smältpunkten för is och kokpunkten för vatten är. Bitumen har ingen definierad smältpunkt utan förändras vid upphettning från väldigt trögflytande till mer lättflytande. Kula och ring – metoden är den vanligaste metoden vid testning (Whiteoak, 1990).

2.7.1.2 Penetration

Penetration är ett sätt att karakterisera och mäta styvheten på bitumen. I Figur 11 ser vi hur ett penetrationstest går till (Redelius, 1999).



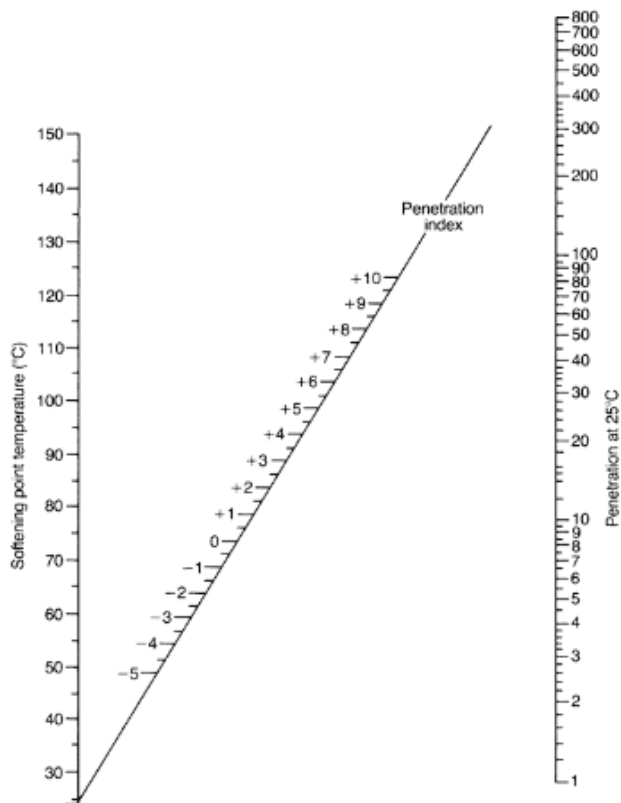
Figur 11: Penetrationstest (Redelius, 1999).

Vid testning förs en standardiserad nål ner i ett tillverkat bitumenprov med bestämda temperaturer, last och tid. Ett mjukare bitumen får ett högre penetrationsvärde och ett hårdare lägre penetration (Redelius, 1999).

Penetrationsindex är ett mått som bygger på resultatet från penetrationsmätningen hos bituminet, dvs ett mått på hur penetrationen ändras när temperaturen förändras. Det finns en formel för att räkna ut det enligt följande:

$PI = 20 \cdot (1 - 25A)/(1 + 50A)$ Där A beskriver förhållandet i temperatur.

$A = (\logpen \cdot T_1 - \logpen \cdot T_2)/(T_1 - T_2)$. Nomografen i Figur 12 visar förhållandet mellan penetrationsvärdet och mjukpunkten, där penetrationsindex är den räta linjen (Whiteoak, 1990).



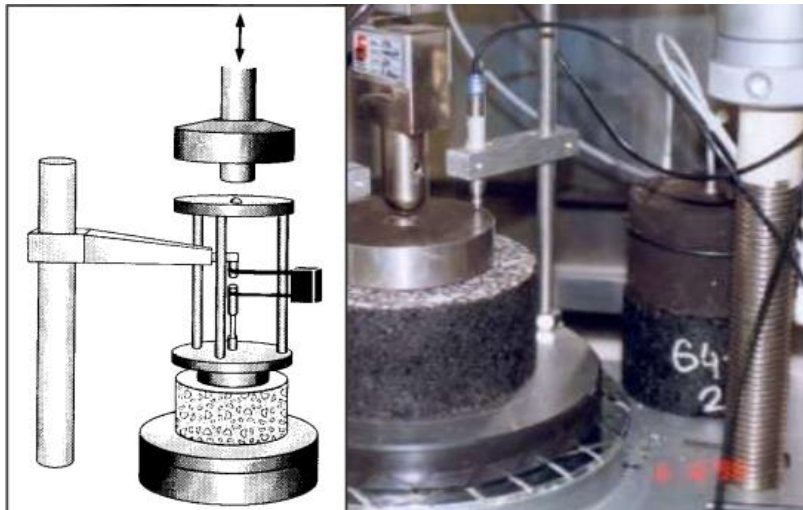
Figur 12: Penetrationsindex (Whiteoak, 1990).

2.7.2 Funktionella mätmetoder

Det finns funktionella egenskaper och krav på den färdiga vägytan. Det gäller parametrar som ojämnheter i längdled och tvärled, exempelvis ett maxvärde för spårdjup. Det finns också krav på textur, friktion, homogenitet, dränering, låg bullernivå och hos asfaltslagren och asfaltmassan krav på nötningsresistens, vattenkänslighet, deformationsresistens, styvhet, vattentäthet. Det finns mätmetoder för att få fram data på dessa egenskaper, både genom fältundersökningar och via laborationer (Olsson m.fl. 1999).

2.7.2.1 Dynamiskt kryptest

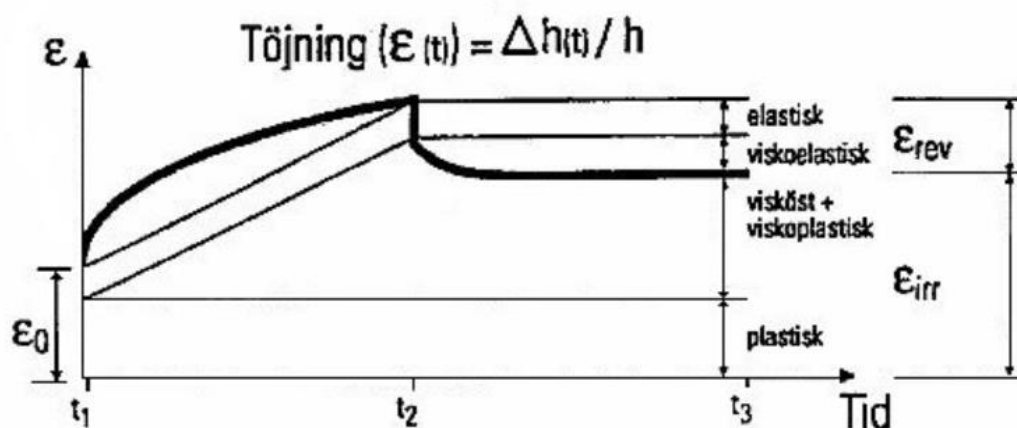
Dynamiskt kryptest mäter deformationsresistensen hos en laborietillverkad asfaltprovkropp eller provkropp uppborrad från väg. Deformationsresistansen är ett värde för den permanenta deformationen och stabiliteten hos asfaltslagret. Figur 13 visar en bild på när testet är uppriggat (Trafikverket, 2014).



Figur 13: Dynamiskt kryptest (Trafikverket, 2014).

Provkroppen ska vila på en platta som har diameter som sträcker sig minst 10 mm utanför provet. Den övre belastningsplattan som kommer ligga mot asfaltprovkroppen ska ha en diameter på 100 mm och en tjocklek på 25 mm. Både underlaget och belastningsplattan i överkant ska vara av härdat stål med slipad yta. Deformationsmätaren ska ha en högsta onoggranhet på 0,005 mm. Det är väldigt viktigt att provkroppens yta är slät och jämn om den inte uppfattas som det bör den poleras. Proven ska ha en höjd på 60 mm med 2 mm felmarginal och en diameter på 148 mm och felmarginal 5 mm. Proven ska tempereras i 40 C° i 4-6h innan testet genomförs (Trafikverket, 2000).

Vid ett normalt utförande av dynamiskt kryptest läggs en belastning på 100 KPa på och belastas som en puls ca 0,2s och efter en viloperiod på 1,8 sekunder, denna belastningstid och viloperiod utgör 2 sekunder. Sammanlagt påläggs 3600 belastningar vilket gör att test tar ungefär 2 timmar att genomföra. Resultatet från kryptestet uttrycks i måttet microstrain (μStrain), som är den enhet som används vid mätning av deformation. Figur 14 visar ett typiskt deformationsförlopp för en provkropp där lasten läggs på vid tiden t_1 och tas bort vid tiden t_2 (Trafikverket, 2000).



Figur 14: Deformationsförlopp (Olsson m.fl, 1999).

Den permanenta deformationen kan också beräknas generellt enligt formeln:

$$\epsilon_{irr}(n) = \left(\frac{\Delta h(n)}{h} \right) \cdot 10^6$$

$\epsilon_{irr}(n)$ = permanent deformation med n belastningar angivet i $\mu\epsilon$

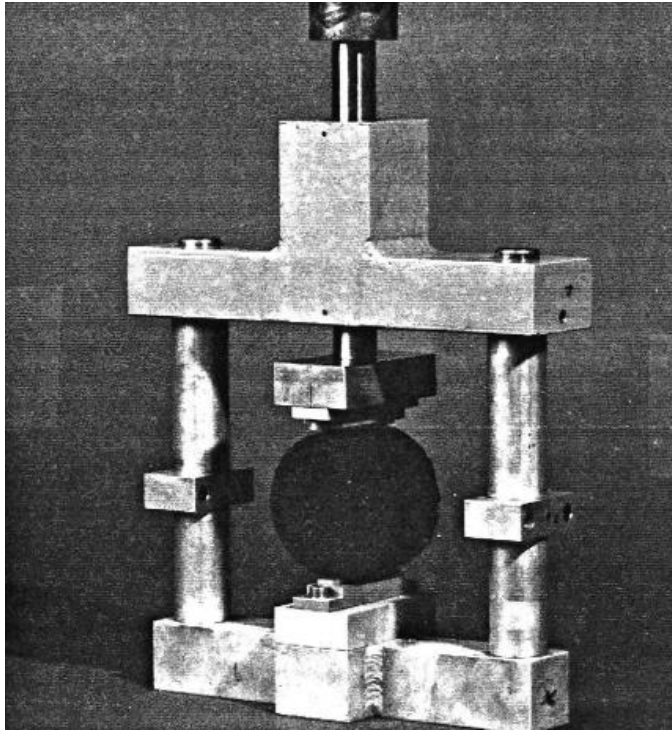
$\Delta h(n)$ = total deformation i mm

h = provkroppens höjd i mm

Den permanenta deformationen beräknas vid 3600 pulser genom ovanstående formel. Trafikverket ställer krav på deformationsresistans (mätt i μStrain) vid olika trafikmängder, se Tabell 4 (Trafikverket, 2000).

2.7.2.2 Styvhetsmoduler Pulserande Indirekt draghållfasthetstest

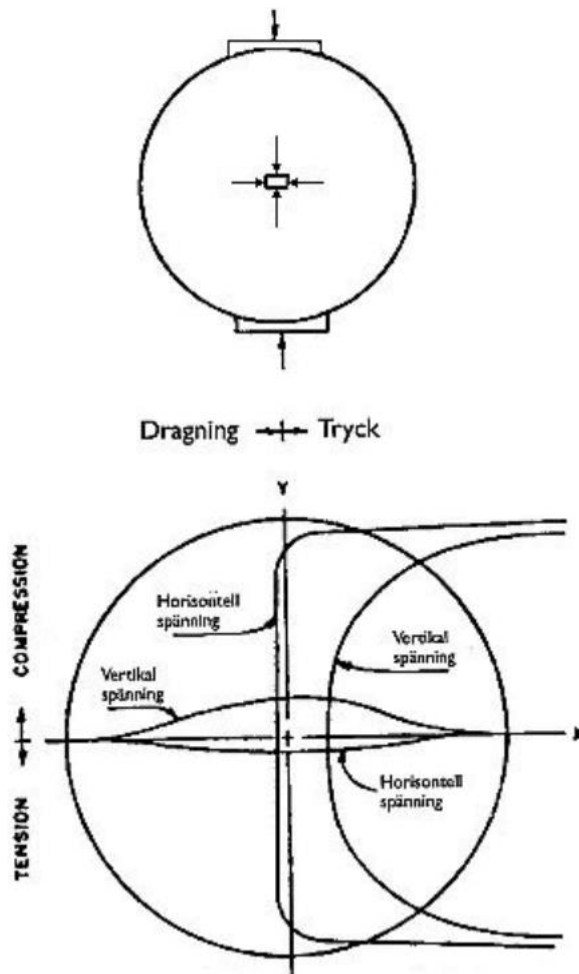
Pulserande pressdragprovning görs på asfaltskroppen för att ta fram styvhetsmodulerna som är ett mått på hur styvt ett material är. Metoden fungerar både för provkroppar framtagna på labb genom Marshallmetoden och provkroppar som är framtagna genom borring ute på vägen. Laboratorietillverkade provkroppar ska ha en höjd på minst 40 mm och en diameter på minst 100 mm vid en kornstorlek på max 22 mm, vid en kornstorlek på max 32 mm ska höjden vara minst 75 mm och diametern minst 150 mm. På bilden i Figur 15 ser vi provkroppen som står på "högkant" och belastas med en last (Trafikverket, 1998).



Figur 15: Pulserande draghållfasthetstest (Göransson och Hultqvist, 1987).

Vid testning bör belastningen vara högst 10 % av den belastning som leder till brott enligt FAS Metod 449, testning bör sedan ske vid den lasten samt vid hälften och 3/4 av den lasten, belastningstiden är enligt metod 0,1s (Trafikverket, 1998).

Den horisontella deformationen med benämning H ska registreras, det finns ett rekommenderat största värde på H som är 0,009 mm, överskrids detta bör man sänka lasten eller förändra temperaturen. Varje prov ska testas 2 gånger. Tre likadana provkroppar testas med varierande temperatur, därefter tas ett medelvärde fram på den horisontella deformationen, eller direkt på styvhetsmodulen om programmet beräknar. Figur 16 visar spänningarna som verkar på asfaltkroppen under belastning (Trafikverket, 1998).



Figur 16: Spänningsfördelning vid pressdragprovning (Olsson, m.fl. 1999).

Genom mätning av den horisontella deformationen kan man med hjälp av dragspänningen räkna ut styvhetsmodulerna. Dragspänningen σ räknas ut enligt följande:

$$A = \Pi \cdot r^2 \sigma_j = 2p_j / (\Pi \cdot d \cdot t)$$

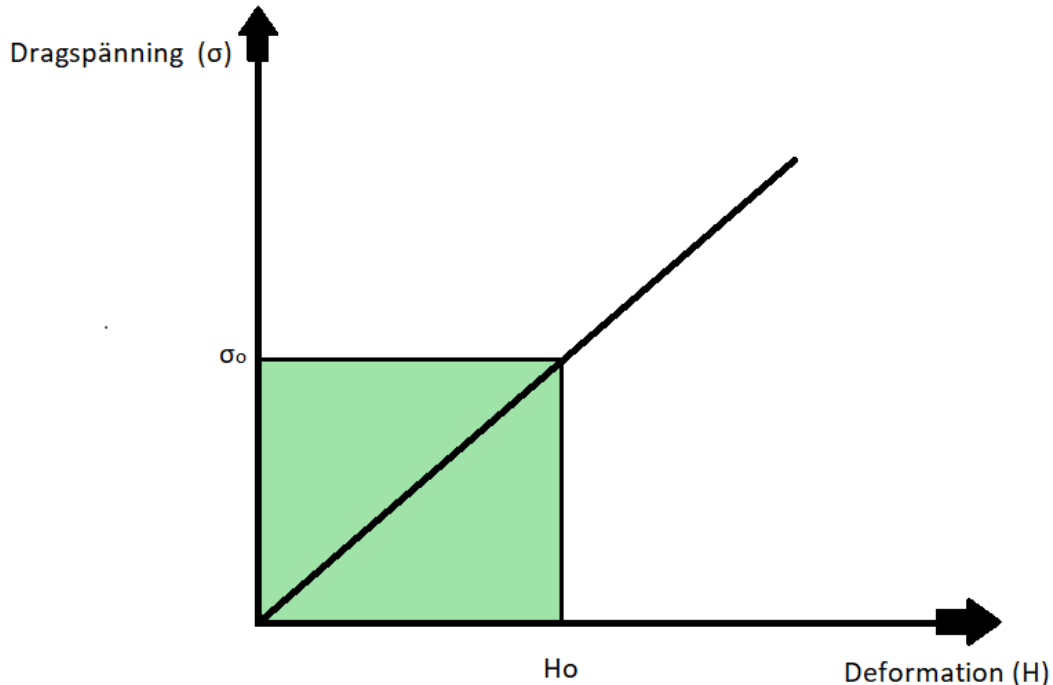
σ_j = dragspänningen i MPa

P_j = pålagda lasten i N (newton)

d = provets diameter i mm

t = provets tjocklek i mm
(Trafikverket, 1998)

Det finns ett samband mellan dragspänningen på y-axeln och deformationen på x-axeln som Figur 17 visar. K-värdet använts för beräkning av styvhetmodul.



Figur 17: Samband mellan dragspänning och deformation (Trafikverket, 1998).

När både horisontella deformationen, dragspänningen och k-värde är beräknat kan man beräkna styvhetsmodulen enligt formeln nedan.

Beräkna styvhetsmodulen ur formeln: $M_s = \pi \cdot d \cdot k \cdot \left(\frac{v+0,27}{2}\right)$

Där M_s = Styvhetsmodulen i MPa med 3 värdesiffror

d = provets diameter i mm med en decimal

k = riktningskoefficienten för den räta linjen = σ_0/H_0

v = kontraktionstalet (kan sättas till 0,35 vid 25°)
(Trafikverket, 1998)

I Tabell 5 redovisas Trafikverkets angivna värden på styvhetsmoduler för slitlager vid dimensionering enligt DK2.

2.7.2.3 Skrymdensitet

Skrymdensiteten anger provkroppens täthet inklusive hålrummen. Provkroppens totala volym inklusive öppna och stängda porer räknas med. Skrymdensiteten räknas ut genom provkroppens våt-vikt och torrsvikt (torrmetoden) (Begzad och Saidi, 2021), se formel nedan:

$$\rho_{ps} = m_{ts} / (m_{ts} - m_{vs}) \cdot \rho_{vs}$$

$$\rho_{ps} = \text{Skrymdensitet} \left(\frac{g}{cm_3} \right)$$

$$\rho_{vs} = \text{Vattnets densitet} \left(\frac{g}{cm_3} \right)$$

$$m_{ts} = \text{Provkroppens torrsvikt (g)}$$

$$m_{vs} = \text{Provkroppens våtsvikt (g)}$$

2.7.2.4 Kompaktdensitet

I kompaktdensiteten räknas endast det kompakta materialets volym, dvs provkroppens täthet utan hålrummen. För att beräkna kompaktdensiteten används en pyknometer där den sönderdelade massan fördelas ner. Sedan sker vägningar av pyknometern tom, med provvikten i och med provsvikt + vatten. Se beräkningen av kompaktdensitet nedan:

$$\text{Kompaktdensitet} = \frac{\text{Provets vikt}}{\text{Provets kompaktvolym}}$$

$$\text{Provets kompaktvolym} = V_p - \left(\frac{(m_2 - m_1)}{\rho_v} \right)$$

$$V_p = \text{pyknometerens volym}$$

$$m_1 = \text{vikt pyknometer}$$

$$m_2 = \text{vikt pyknometer} + \text{prov}$$

$m_3 = \text{vikt pyknomter} + \text{prov} + \text{vatten}$

$\rho_v = \text{vattnets densitet}$

2.7.2.5 Hålrums halt

Hålrums halten är den öppna volymen i asfaltmassan som endast består av luft, beroende på asfaltmassan och kornstorlek så varierar hålrums halten. Hålrums är starkt förknippat med dräneringsmöjligheter, deformationsegenskaper, blödning och slitage, där av är det en viktig parameter att undersöka. Hos ett slitlager varierar oftast hålrums halten mellan 2–8 % beroende på asfaltssort. En dränerande massa ABD har betydligt högre hålrums halt än den täta ABTn som fokus ligger på i detta arbete. För det bitumenbundna bärlagret är kornstorlekarna något större och högre hålrums halt, mellan 3–8%. Det finns en formel för att räkna ut hålrums halten genom kompakt densitet och skrymddensitet (Trafikverket, 2021).

$$\text{Hålrums halt} = 100 \cdot (\rho_{PK} - \rho_{PS}) / \rho_{PK}$$

$\rho_{PK} = \text{Kompaktdensitet}$

$\rho_{PS} = \text{Skrymddensitet}$

I Tabell 9 redovisas Trafikverkets krav på Hålrums halt för en ABT 11.

Tabell 9: Hålrumsintervall enligt Marshall (Trafikverket, 2021).

Hålrumsintervall Marshall (Vol-% Min – Max).

Bindemedelstyp	Hålrums halt [%]
50/70	1,5-3,5
70/100	1,5-3,5
100/150	1,5-3,5
160/220	1,5-3,5
330/430	1,5-3,5

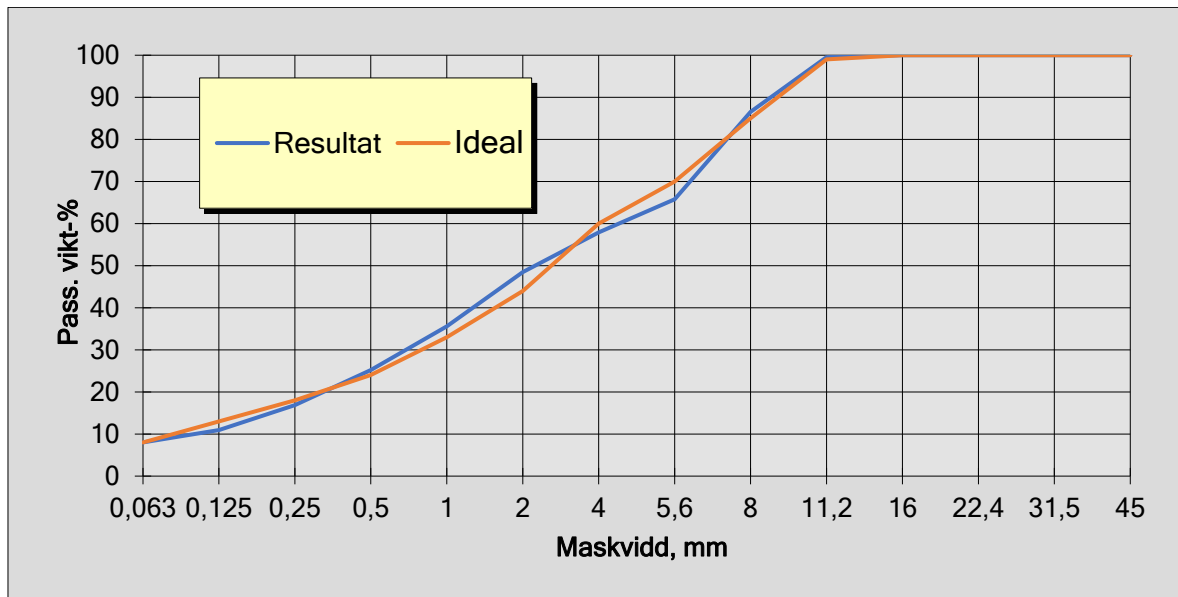
3 Utförda undersökningar

På NCC Industrys labb i Upplands Väsby genomfördes alla laborationstester som studien innehåller. Fyra satser på 5308 gram blandades, mängden valdes utifrån vad som är lämplig storlek på sats i laboratorieblandaren. Testerna som genomfördes var styvhetsmodul och dynamiskt kryptest, utöver det så kontrollerades även hålrums halten samt penetration och mjukpunkt på bindemedlet.

3.1 Proportionering

Stenmaterialet i blandningarna kommer från Rikstens bergtäkt i Södra Stockholm. Proportioneringen följer ett standardrecept för ABT 11 som följer NCC:s ideal på kornkurvan hos en ABT 11. En jämn kurva som innehåller alla kornfraktioner med max stenstorlek på 11 mm.

I Figur 18 så ser vi kornfördelningskurvan för ABT 11 där resultatet är den blåa linjen och NCC:s ideal den orangea linjen. På Y-axeln har vi den passerade mängden i vikt - % och på X-axeln maskvidden i sikten angivet i mm.



Figur 18: Kornstorleksfördelning ABT 11.

I Tabell 10 ser vi proportioneringsresultatet med vikten i % och mängden i kg för varje kornfraktion.

Tabell 10: Proportioneringsresultat.

Fraktion	korn. dens	Vikt	Mängd	Ack. mängd
Enhet	g/cm ³	%	kg	kg
filler	2,71	4,1	0,204	0,204
0-4	2,71	53,8	2,689	2,893
4-8	2,71	26,7	1,334	4,227
8-11	2,71	15,5	0,773	5,000
11-16	2,71	0,0	0,000	5,000

Enligt proportioneringsresultatet blandades de 4 satserna med 5 kg stenmaterial i varje, detta viktades upp i labbet.

3.2 Bindemedelshalt

Satsen innehåller totalt 5308 gram med en bindemedelshalt på 5,8 %, vilket ger 308 gram bindemedel per sats med olika mängd tallbecksolja.

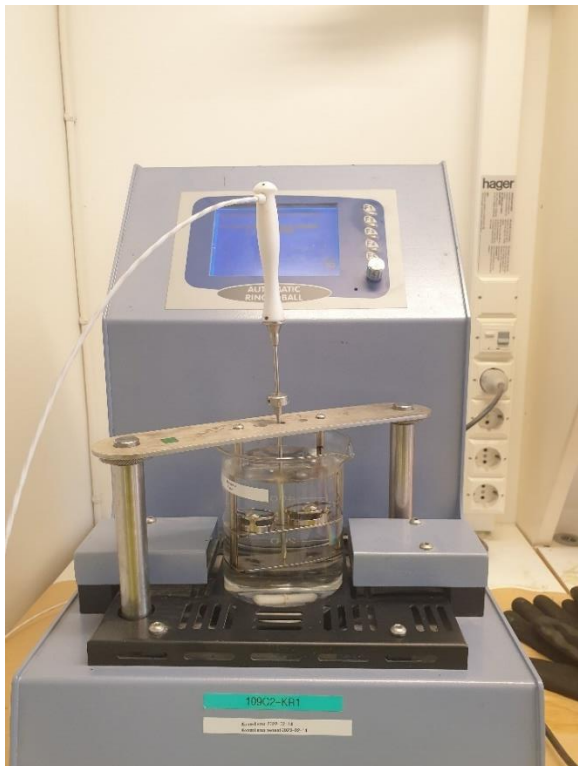
Tabell 11: Bindemedelshalt.

Bitumen vikt - %	Bindemedelsmängd	Sats storlek
%	kg	kg
5,8	308	5308

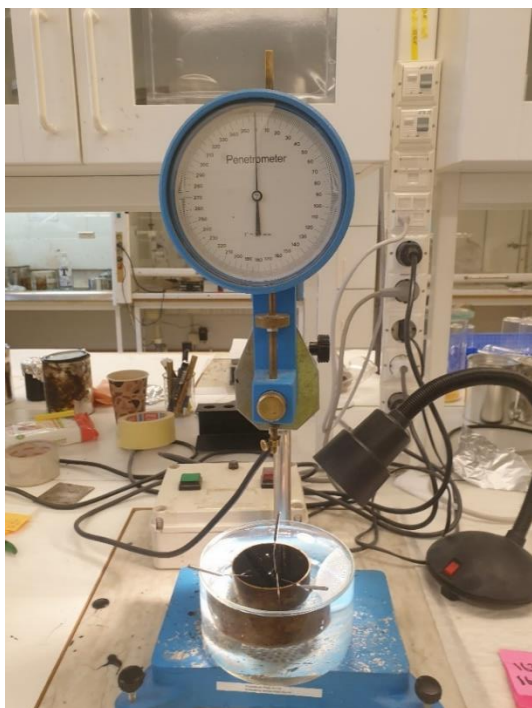
3.3 Penetration och mjukpunkt

Tallbecksolja och 100/150-bitumen värmdes upp till 130 C° och blandades tillsammans i en ny burk med 285g bitumen och 15g tallbecksolja. Tallbecksoljan motsvarar 5% av hela bitumenblandningen. Under omrörningen sjönk temperaturen till 100 C° och värmdes där efter upp igen till provberedningstemperatur för 160/220-bitumen. Därefter hälldes blandningen över i en penetrationsskål och 4 mjukpunktsringar. Blandningen för penetration kylades ner till rumstemperatur i 1,5h och lades sedan i vattenbad för att uppnå en temperatur på 25 C°, också det i 1,5h, efter vattenbadet genomfördes penetrationsanalysen där 3 tester utfördes med 100g-vikt i 5 sekunder vid en temperatur på 25 C° och med 3 olika nålar, enligt Figur 19. Kula och ringmetoden (se Figur 19) genomfördes för mjukpunkten där mjukpunktsringarna svalnade i 35 minuter innan de skrapades rent så en slät yta erhöles. Sedan placerades provet i avjonat vatten där temperaturen höjs långsamt, när kulorna faller genom bitumenblandningen registreras temperaturen vilket

motsvara blandningens mjukpunkt. Dessa penetrations och mjukpunktstester utfördes likadant för resterande blandningar.



Figur 19: Mjukpunktstest 109C2-KR1 (kula och ring – metoden).



Figur 20: Penetrationstest 109C2-PNRI.

3.4 Blandning av asfaltsmassa ABT 11

Stenmaterialet och blandningskärlet ställs in i värmeugnen kvällen innan blandning så en temperatur på 150 C° grader kan uppmätas morgonen efter. Därefter så värms bitumen och tallbecksoljan upp till 130 C° för att blandas tillsammans och sedan stoppas in i ugnen igen för att uppnå en blandningstemperatur på 150 C° som är enligt standard för 160/220, se Figur 21.



Figur 21: Värmeugn innehållande stenmaterial, tallbecksolja, bitumen och blandningskärl.

Stenmaterialet och rätt halt bindemedel enligt Trafikverkets krav Tabell 3 blandas i en laboratorieblandare och portioneras sedan upp till 3 prover med ca 1200g i varje, totalt 12 provkroppar.



Figur 22: Laboratorieblandning.

Tabell 12: Blandning av massa.

Blandning	Bitumentyp	Bitumen (g)	Tallbecksolja (g)	Stenmaterial (g)
1	70/100	277,2	30,8 (10%)	5000
2	50/70	261,8	46,2 (15%)	5000
3	100/150	292,6	15,4 (5%)	5000
4	160/220	308	0	5000

3.5 Marshallpackning

På samtliga 12 prover genomfördes marshallpackning efter temperaturavläsning på 135 C° i ugnen. Asfaltmassan hälldes sedan över i en förvärmad form och placerades i marshallpackaren i Figur 22, som automatiskt packar provet 50 gånger på vardera sida. Efter packningen togs proverna ut och fick svalna i mer än 30 minuter och kunde sedan utan problem pressas ut. Måtten på provkropparna blev enligt Marshall standard en diameter på 101 mm och en höjd på 62 mm.



Figur 23: Maskin för marshallpackning 101A1-X-MS1.

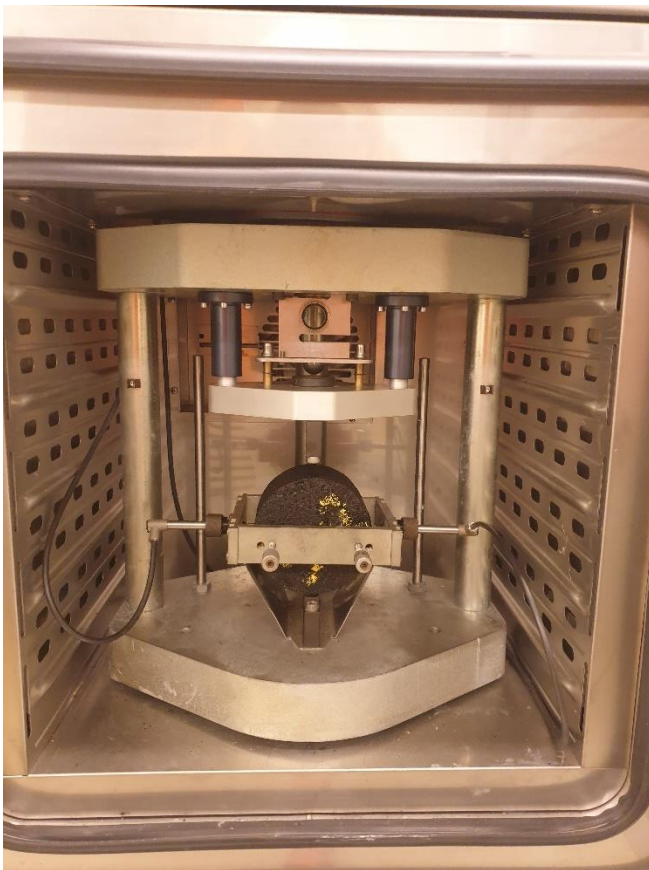
3.6 Skrymdensitet

Efter att provkropparna svalnat så beräknades skrymdensiteten för varje provkropp genom att väga provkropparna i torrt tillstånd. Därefter läggs provkropparna i ett tempererat bad på 25 C° där de vilar i 5 minuter och vägs sedan i badet. Därefter används formeln för torrmetoden, se kapitel 2.6.2.3 Skrymdensitet.

3.7 Styvhetsmodul

Efter att provkropparna rumstempererats i mer än en vecka efter blandning så påbörjades testningen, där icke förstörande testning i form av styvhetsmodul utfördes först. Infracestmaskinen riggades upp enligt figur 24, dataprogrammet

som används för registrering av värden är DruckSchwell. Testet kördes vid 1 temperatur och avviker där med från metodbeskrivningen för styvhetsmodul i kapitel 2.6.2.2 Styvhetsmodul, temperaturen som valts är 10 C°, där av så sätts provkropparna i ett vattenbad med temperatur 10 C° och får vila där i 2h (vakumpackade). På grund av tekniska problem så kommer testningen ske med en belastningstid på 0,05s och inte enligt metod 0,1s, detta kommer inte påverka särskilt mycket då testerna är jämförande men kommer finnas med i beaktningen vid analysen av resultaten. 5 förbelastningar genomfördes där en horisontal deformation på 0,005 mm registreras. Därefter så följde 5 pulser med lika horisontal deformation och 5 värden på styvhetsmodulen registrerades med en spridning på <1000 MPa, se Bilaga 7.8. Sedan beräknades medelvärdet på varje provkropp samt det totala medelvärdet för hela blandningen.



Figur 24: Styvhetsmodulstest 1011B1-BU2.

3.8 Dynamiskt kryptest

Samtliga 12 provkroppar tempererades var för sig i 4-6h enligt metod, se kapitel 2.6.2.1 Dynamiskt kryptest. Provkropparna som användes avviker från kravet på en diameter på 150 mm, i denna studie har provkropparna en diameter på

101 mm och följer där av inte metodens beskrivning ur den synvinkeln, höjden på provkropparna är densamma som kravet i metoden. Provkroppen stoppas in i maskinen enligt Figur 25, där ett värmeskåp håller värmen till 40 C° under hela testet. Därefter påbörjas testet med en förbelastning i 10 minuter för att jämna ut ytan. Sedan startar testet och 3600 pulser belastar provkroppen under 2h enligt metodbeskrivningen i kapitel 2.6.2.1 Dynamiskt kryptest. Diametern på belastningsplattan som skulle matas in i programmet förstods på fel sätt och provkroppens diameter matades istället in vilket bidrog till en skillnad på 5mm. Detta misstag ledde till en högre belastning och gav något högre deformationsresistens och permanent deformation.



Figur 25: Dynamiskt kryptest.

3.9 Kompaktdensitet

När samtliga tester är utförda kan metoden för att ta fram hålrumshalten fortsätta där första steget var skrymdensitet, nu beräknades också kompaktdensiteten. Samtliga provkroppar ställdes in i värmeskåpet i 40 minuter på 134 C°, därefter sönderdelades provkropparna på plåtar och ställdes in ytterligare 15 minuter för att vara säkra på att allt vatten avdunstat. Sedan hälldes massan på

bakplåtspapper och sönderdelades ytterligare samt spreds ut för att torka, enligt Figur 26.



Figur 26: Uppdelning och torkning av asfaltmassa.

Asfaltmassan hälldes sedan över i en pyknometer som fylldes med vatten och placerades i ett skåp där luft sögs ut ur pyknometern under vibrerande förhållanden, se Figur 27.



Figur 27: Vakumsugning av pyknometer.

Därefter vägdes pyknometern igen innehållande vatten och asfaltmassa efter vilande i 25 C° vatten i 30 minuter enligt Figur 28, sedan beräknades

kompaktvolymen och slutligen kompaktdensiteten för provkroppen. När kompaktdensiteten beräknats kan också hålrumshalten på varje provkropp beräknas enligt formeln i kapitel 2.7.2.5.



Figur 28: Pycnometer i tempererat vattenbad.

4 Resultat

4.1 Penetration och mjukpunkt

Penetrationsresultatet är baserat på medelvärdet för 3 nålar och mjukpunktsresultatet är medelvärdet för 2 kulor.

Tabell 13: Penetration och Mjukpunkt.

Blandning	Penetration [mm/10]	Mjukpunkt [C°]	Penetrationsindex	Penetrationsklass
160/220	163	42,2	0	160/220
100/150 5% TOP	180	39,3	1,5	160/220
70/100 10% TOP	162	40,6	-0,5	160/220
50/70 15% TOP	157	41,4	-0,5	160/220

Blandningarna 70/100, 50/70 och 160/220 ligger väldigt nära varandra i penetration och mjukpunkt. Det som sticker ut i det här resultatet är den något högre penetrationen för blandning 100/150 jämfört med resterande.

4.2 Hålrums halt

Skrymdensitet vid ett medelsnitt för 3 provkroppar blev enligt följande i Tabell 14.

Tabell 14: Skrymdensitet.

Blandning	Skrymdensitet [kg/m ³]
160/220	2416
100/150 + 5% TOP	2425
70/100 + 10% TOP	2426
50/70 + 15% TOP	2424

Skrymdensiteten är som högst i blandningen med 10% tallbecksolja och som lägst i den konventionella 160/220 blandningen.

Kompaktdensiteten vid ett medelvärde för 3 provkroppar blev enligt följande i Tabell 15.

Tabell 15: Kompaktdensitet.

Blandning	Kompaktdensitet [kg/m ³]
160/220	2482
100/150 + 5% TOP	2477
70/100 + 10% TOP	2470
50/70 + 15% TOP	2477

Kompaktdensiteten för blandningarna efter beräkning enligt kapitel 2.7.2.4 Kompaktdensitet blir ca 2470 kg/m³.

Hålrums halten är beräknad enligt metoden i kapitel 2.7.2.5 och redovisad i Tabell 16.

Tabell 16: Hålrums halt.

Blandning	Hålrums halt [%]
160/220	2,24
100/150 + 5% TOP	2,11
70/100 + 10% TOP	1,81
50/70 + 15% TOP	2,46

Hålrums halten är som högst i blandning 160/220 med 2,24% och som lägst i blandningen 70/100 med en hålrums halt på 1,81%.

4.3 Styvhetsmodul

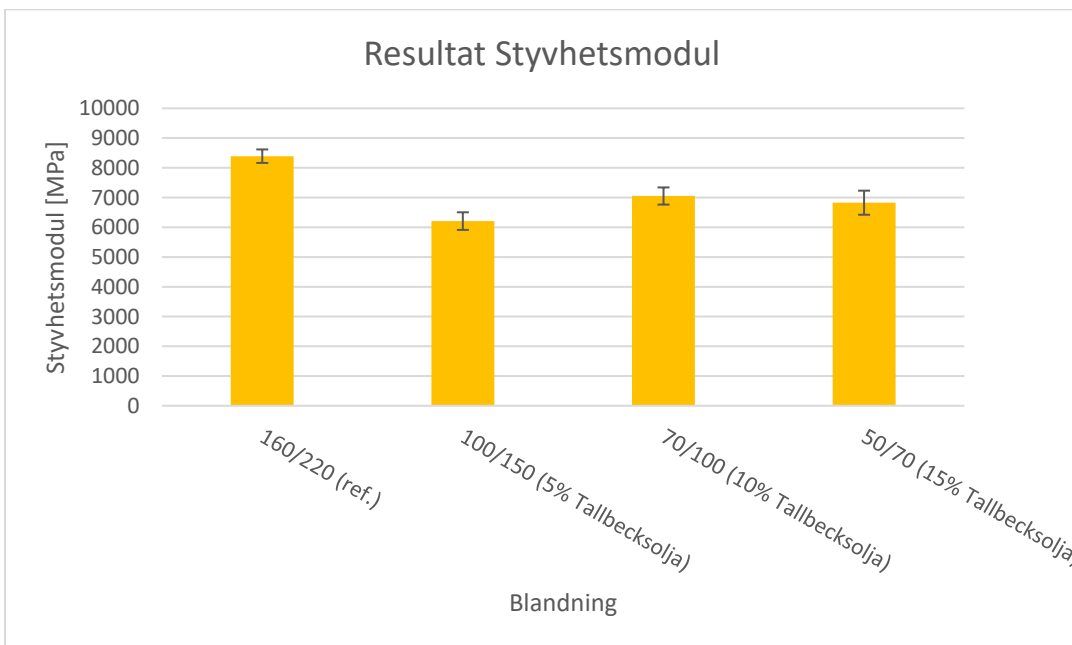
Styvhetsmodulen är framräknade genom programmet DruckSchwell som tar fram 5 styvhetsmoduler per provkropp (5 pulser). Därefter har medelvärdet beräknats för dessa 5 pulser och sedan medelvärdet för hela blandningen, vilket är sammanställt i Tabell 17.

Tabell 17: Styvhetsmodul.

Blandning	Temperatur [C°]	Styvhetsmodul [MPa]
160/220	10	8391
100/150 5% TOP	10	6208
70/100 10% TOP	10	7052
50/70 15% TOP	10	6827

Styvhetsmodulerna som är redovisade i Tabell 17 visar att den högsta styvhetsmodulen är för blandningen 160/220 och den lägsta är för blandningen 100/150 med 5% Tallbecksolja.

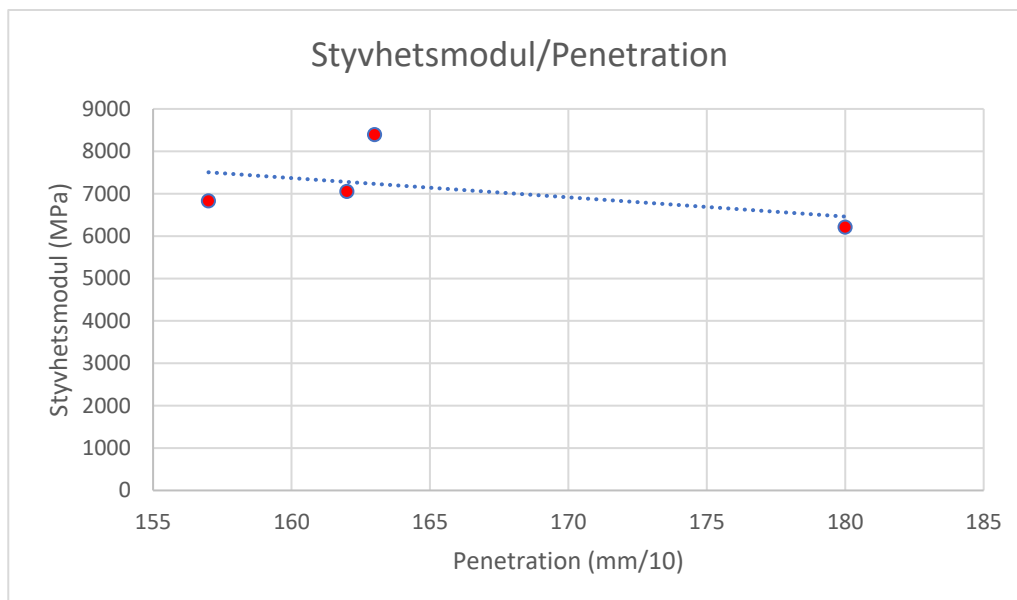
I Figur 29 kan vi se resultatet i ett stapeldiagram.



Figur 29: Styvhetsmodul.

Spridningen finns med i Figur 29 som är angivet i standardavvikelse, vilket också går att titta närmare på i Bilaga 8.

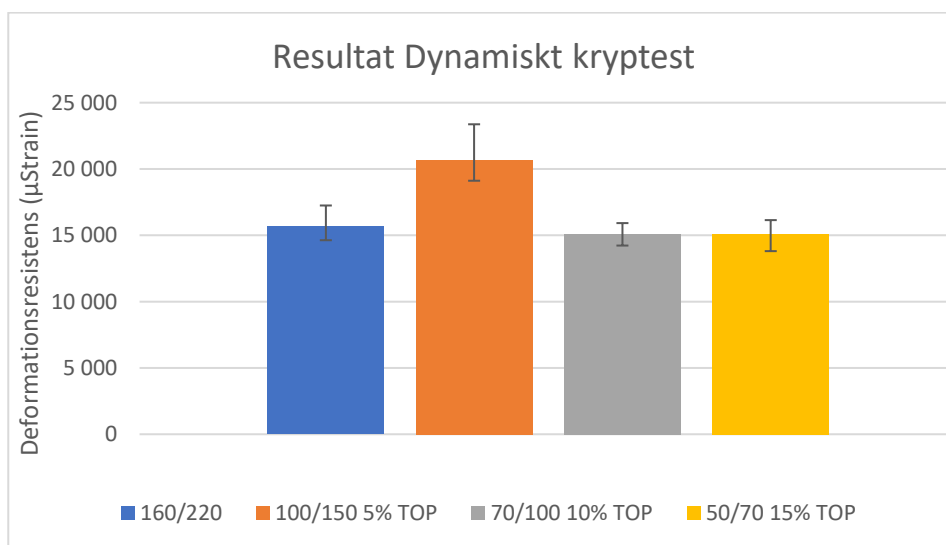
Figur 30 visar sambandet mellan blandningarnas styvhetsmodul och penetrationen, där styvhetsmodulen är på y-axeln och penetrationen på x-axeln. De röda punkterna i figuren motsvarar blandningarna.



Figur 30: Samband mellan styvhetsmodul och penetration.

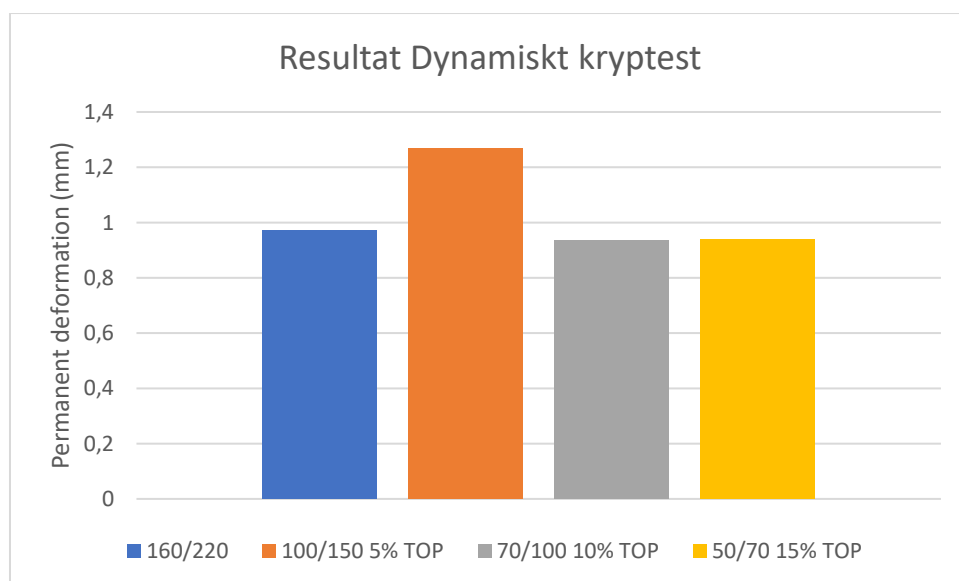
4.4 Deformationsresistens

Deformationsresistensen och den permanenta deformationen uppmättes genom dynamiskt kryptest för samtliga 12 provkroppar. Resultatet är baserat på medelvärdet för 3 provkroppar i varje blandning, se Figur 31 och Figur 32.



Figur 31: Dynamisk kryptest med standardavvikelse.

100/150-blandningen sticker ut i jämförelse med de andra.
 I Figur 31 finns även standardavvikelsen med som visar på resultatets spridning.



Figur 32: Resultat permanent deformation.

Figur 32 visar att blandningen med 100/150 som bitumen och en tillsats på 5% tallbecksolja deformerar mest medan blandningarna med 10% och 15% tallbecksolja deformerar minst. Samtliga blandningar ligger på en deformation mellan 0,9 och 1,3 mm.

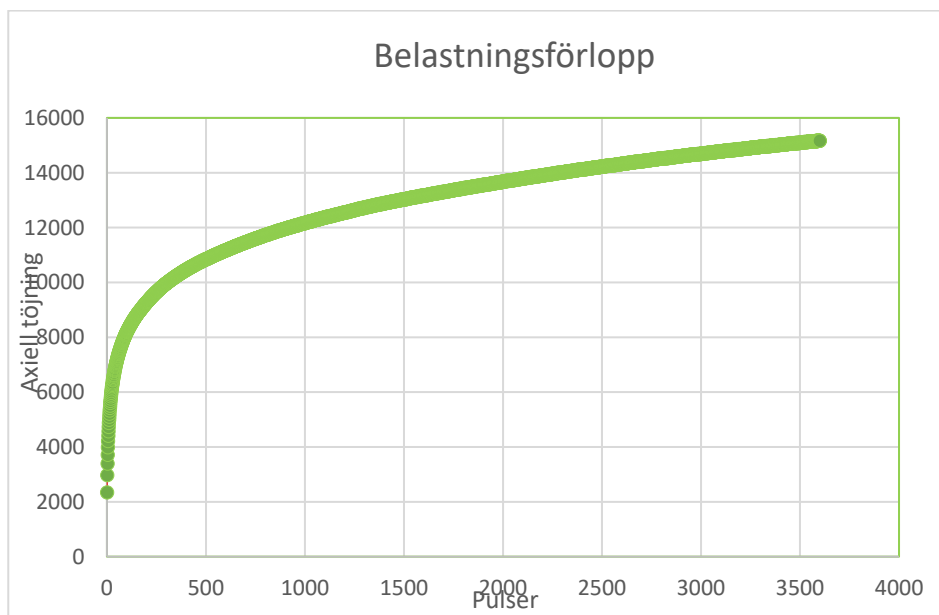
Tabell 18 visar exakta värdena på resultatet av det dynamiska kryptestet.

Tabell 18: Resultat dynamiskt kryptest.

Blandning	Temperatur [C°]	Deformationsresistens [µstrain]	Permanent deformation [mm]
160/220	40	15 652	0,970
100/150 5% TOP	40	20 667	1,268
70/100 10% TOP	40	15 102	0,936
50/70 15% TOP	40	15 113	0,937

I Tabell 18 syns att den högsta uppmätta deformationsresistensen är 20 667 μ strain och den lägsta deformationsresistensen är 15 102 μ strain för blandningen med 10% Tallbecksolja. Den permanenta deformationen var som högst för blandningen med 5% Tallbecksolja och resultatet var 1,268 mm.

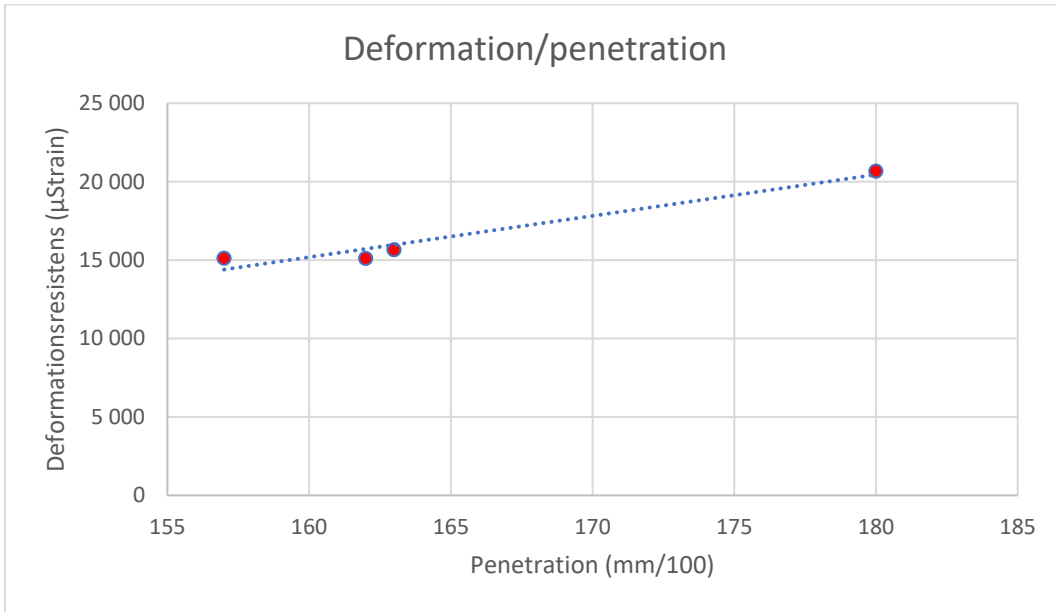
Varje provkropp belastades av 3600 pulser i totalt 2h. Figur 33 visar belastningsförloppet med antal pulser på x-axeln och deformationsresistensen på y-axeln. Grafen i Figur 33 visar ett exempel på belastningsförloppet för dynamiskt kryptest, blandningen som visa är 70/100 med 10% tallbecksolja.



Figur 33: Belastningskurva dynamiskt kryptest.

Provkroppen deformeras väldigt mycket de 500 första pulserna och avtar sedan, vilket grafen i Figur 33 tydligt illustrerar. Detta är karaktäristisk för asfalt men problemet är om deformationen inte börjar avta.

Figur 34 visar sambandet mellan blandningarnas deformationsresistens och penetrationen, där deformationsresistensen är på y-axeln och penetrationen på x-axeln.



Figur 34: Samband mellan deformation och penetration.

5 Diskussion och slutsats

5.1 Resultatdiskussion

Tidigare forskning (Ingrassia 2020) har visat på att biobindemedel har jämförelsebara eller bättre effekter på vattenkänslighet, åldringsbeständighet, utmattnings- och återvinning. Biooljan som Ingrassia använder som uttryck i sin rapport är desamma som tallbecksolja.

Vid undersökning av tallbecksolja som tillsats i bindemedel har testning gjorts på ABT 11 och samtliga blandningar uppfyller kravet för hålrums halten enligt Tabell 9. Skrymdensiteten och kompaktdensiteten för samtliga blandningar ligger väldigt nära varandra och ingen tydlig avvikelse går att se också så hålrums halten. Tallbecksoljan i blandningarna påverkar därmed inte skrymdensiteten och kompaktdensiteten, därav i förlängningen inte heller hålrums halten.

Penetrationstestet som gjordes visade att samtliga blandningar hamnade i penetrationsklass 160/220. Blandningen 160/220 (utan tallbecksolja) och blandningarna med 10% och 15% i tillsats fick en penetration runt 160 vilket betyder att det blir väldigt lätt att jämföra med varandra i de funktionella testerna. Däremot så blev blandningen med 100/150 bitumen och 5% i tillsats något och fick en penetration på 180. Testningen visar att ersätta bitumen med tallbecksolja kräver ett hårdare bitumen för att kunna höja mängden tallbecksolja. En fördubbling av tallbecksolja i takt med hårdare bitumen ger inte exakt samma penetrationsvärde eftersom penetrationen på det ursprungliga bituminet varierar men man kan enligt resultatet av detta garantera lika penetrationsklass. Det avvikande värdet i Tabell 13 som fick en penetration på 180 kan förklaras genom att det ursprungliga bituminet (100/150) kan ha varit i den mjukare delen av intervallet medan bitumen 70/100 och 50/70 kan ha varit i den styvare delen av intervallet. Det är viktigt att ha det i beaktning vid analys av de funktionella testerna. Det ursprungliga bituminet är inte testat vilket gör det svårt att veta exakt hur mycket tallbecksolja påverkar penetrationen, men det vi med säkerhet kan säga är att vid fördubbling av tallbecksolja krävs en lägre penetrationsklass och resultatet med dessa tillsatser ger penetrationsklass 160/220.

Testerna på styvhetsmodul visade enligt Tabell 17 att blandningen utan tallbecksolja blev mellan 1000–1500 MPa styvare än blandningarna med 10%

respektive 15% tallbecksolja. Eftersom blandningen med 5% tallbecksolja har en betydande högre penetration och en lägre mjukpunkt så blir jämförelsen där svårare. Styvhetsmodulen för blandningen med 5% tallbecksolja blev ca 800 MPa lägre än blandningen med 10% och 15%, vilket kan förklaras med den högre penetrationen och lägre mjukpunkten. Men det är tydligt att tallbecksoljan bidrar till en lägre styvhetsmodul jämfört med blandningar utan tallbecksolja trots lika penetration. Detta betyder att tallbecksoljan bidrar till en lägre styvhetsmodul, vilket förmodligen beror på den högre viskositeten hos tallbecksoljan jämfört med vanligt bitumen. Däremot så har inte mängden tallbecksolja påverkat styvheten hos asfaltsmassan då 10% och 15% tallbecksolja ger i princip lika styvhetsmodul. Samtliga blandningar uppfyller kraven för styvhetsmodul som ligger på mellan 5500–9000 MPa vid 10 C° och en högtrafikerad väg med en ÅDT för tunga fordon som är större än 1000, se Tabell 6. Blandningen utan tallbecksolja med en MPa över 8000 bör inte användas på mellantrafikerade vägar och lågtrafikerade vägar då kravet är en ÅDT på mindre än 7000 MPa, se Tabell 6.

Det dynamiska kryptestet som genomfördes i 40 C° för samtliga blandningar resulterade i mätvärden för permanent deformation och deformationsresistens. Blandning 100/150 med 5% tallbecksolja är den blandning som deformerades mest enligt Tabell 18, drygt 0,3 mm mer än de andra blandningarna. Slutsatserna som dras utifrån den här skillnaden är likt slutsatsen angående en lägre styvhetsmodul, dvs att det högre penetrationsvärdet på bindemedelsblandningen har påverkat avvikelserna för denna blandning jämfört med resterande.

Blandningen med 15% och 10% tallbecksolja deformerar i princip lika i testmetoden, dvs likt i styvhetsmodultestet så har mängden tallbecksolja inte påverkat deformationsegenskaperna. Däremot så ser vi i Tabell 18 att den permanenta deformationen och deformationsresistensen är lägre för blandningen med 10% och 15% jämfört med 160/220 blandningen utan tallbecksolja, dvs i det här testet har tallbecksoljan lett till positiva effekter på bärigheten och deformationsegenskaperna. Det som också går att utläsa från det här testet är att tallbecksoljans mängd inte påverkat resultatet, dvs om tillsatsen är 10% eller 15% påverkar inte om man använder ett hårdare bitumen för den större tillsatsen.

Blandningen 160/220 är styvare än blandningen med 70/100 och 50/70 men deformerar mer. Detta kan ha flera förklaringar, tex temperaturen vid testning. Styvhetsmodulerna är testade vid 10 C° och dynamiskt kryptestet vid 40° vilket kan ha sin påverkan då inga tester i den här studien gjorts på tallbecksoljans temperaturkänslighet. Hypotetiskt skulle det kunnat innebära att tallbecksoljan bidrar till att massan deformerar mindre vid högre temperaturer än en vanlig konventionell massa, dvs att asfaltsmassor med tallbecksolja som tillsats klarar

högre temperaturer. Kraven i Tabell 4 på deformationsresistens för tung trafik uppnås inte, vilket är väntat i med det mjuka bindemedel som valts.

Sammanfattningsvis kan man konstatera den tekniska kvalitén hos asfaltmassan i form av deformationsegenskaper och styvhetsmodul inte påverkas av tallbecksolja som tillsats sett till denna studies resultat. Samtliga resultat är väldigt likvärdiga med varandra och det går inte att utesluta att det är ”felmarginalen” som påverkat de skillnader som finns.

Att kraven inte uppfylls för tung trafik är som sagt väntat. Deformationstesterna visade att tallbecksoljan har jämförelsebara egenskaper med den konventionella blandningen. Styvhetsmodultesterna visar på att den konventionella blandningen är något styvare. Den lägre styvhetsmodulen hos blandningarna med tallbecksolja gör att massan är bättre mot sprickbildning och i utmattning men sämre när det kommer till den last fördelade förmågan.

Men resultatet visar på väldigt små skillnader på styvhet hos blandningarna och är förmodligen inget som skulle påverka valet av massatyp i med att samtliga blandningar uppfyller kravet för högtrafikerade vägar. Resultatet visar på att mängden tallbecksolja som tillförs har ingen betydelse på asfaltens deformationsegenskaper och styvhetsmodul om penetrationen och mjukpunkten är lika efter tillsats av olika mängder tallbecksolja. I diagrammen i kapitel 4 Resultat ser vi på standardavvikelsen att spridningen är väldigt liten vilket styrker trovärdigheten i resultaten.

Något som går att utläsa utifrån penetrationstesterna är att det kommer bli svårt att ha större mängder tallbecksolja i ett bindemedel som man vill ska få penetration 70/100 exempelvis. Hypotetiskt kan man tänka sig att ersätta 5% tallbecksolja av ett 50/70 bitumen och det skulle resultera i ett 70/100.

Utifrån resultaten som den här studien tagit fram på den tekniska kvaliteten så visar tallbecksoljan som tillsats på jämförande egenskaper med den konventionella massan. Då är nästa fråga om det faktiskt är bättre ur ett miljö och hållbarhetsperspektiv?

Källor visar på att det totala koldioxidutsläppet under tillverkningsprocessen är högre för tallbecksolja än konventionellt bitumen med råolja, vilket skulle betyda att råolja trots allt är bättre i miljösynvinkel än tallbecksolja, men detta går att diskutera. Kraton har i sin studie kommit fram till ett negativt värde på koldioxidutsläppen för tallbecksolja, vilket i jämförelse med det vanliga bituminet med råolja får stora skillnader på totala koldioxidutsläppen för hela cykeln. Med minusvärdet menar man att det biogena kolet tar upp mer koldioxid än vad det släpper ut. I beräkningen så gör Kraton ett antagande att det biogena kolet som man beräknat till -2180 kg CO₂ eq/ton inte kommer ut i atmosfären igen som koldioxid. Med den beräkningen hävdar man att tallbecksoljan (kolet)

tas ur kretsloppet och bildar en kolsänka i vägen och kan på det sättet räknas som minus.

Om man ska kunna räkna biogen asfalt som en kolsänka måste hårda krav på återvinningen av asfalt ställas. Återvinningen av asfalt får inte bidra till att kolet i massan släpps ut som koldioxid under återvinningsprocessen. Därav blir fräsning och granulathantering extremt viktig. Det krävs att den mängden tallbecksolja som återvinns är lika stor som den mängden tallbecksolja som lades ut från början, så 100% återvinns. I tidigare studier (Ingrassia 2020) har tallbecksoljan visat sig ha positiva effekter på åldringsbeständigheten i jämförelse med konventionellt bitumen, vilket leder till positiva effekter i återvinnings synpunkt. Biobindemedel visade sig vara 100% återvinningsbart och effektivt vid varm återvinning av asfaltsmassa. Detta stärker Kratons beräkning men ställer trots det stora krav på hur det praktiskt går att genomföra.

Ur rena tillverkningsutsläpp så är råoljan bättre än tallbecksoljan med ca 500 kg/CO₂eq/ton vilket är anmärkningsvärt mycket, detta beror till största delen av de stora koldioxidutsläppen vid skörden av skogen där alla dagens maskiner drivs på fossila bränslen och släpper ut stora mängder koldioxid vid förbränningen. Ska man kunna utmana det konventionella bituminet med ett biogent bitumen krävs det också att man minskar utsläppen vid skogsindustrin. Oavsett om man räknar det biogena kolet som en kolsänka i vägen eller ej kan man med säkerhet säga att den största fördelen med tallbecksolja som tillsats i bituminet jämfört med råoljan är dess förnyelsebarhet. Tallbecksolja och råtallolja är förnyelsebart och kan inte ta slut vilket råoljan kan. Om det dessutom går att minska skogsindustrins stora utsläpp och säkerställa att kolet blir kvar i vägen som en kolsänka så finns det väldigt goda utsikter för tallbecksolja som tillsats i bituminet ur ett klimatperspektiv.

5.2 Metoddiskussion

Först genomfördes en litteraturstudie som underlag för studien och laborationerna som sedan utfördes. Valet av laborationstester generellt som metod var givet, eftersom tidigare forskning inte finns på det som den här studien syftar till. Hade tidigare forskning funnits hade eventuellt intervjuer kunnat varit en metod, men blev aldrig aktuellt i det här fallet. Men däremot vilka tester som utfördes går att diskutera.

Det finns tidigare testning på biobindemedel i jämförelse med konventionellt bitumen vilket valdes att inte undersökas i den här studien. Funktionella tester på asfaltsmassan valdes i form av dynamiskt kryptest och styvhetsmodul, där hade man kunnat tänkt sig även andra funktionella tester som tex

vattenkänsligheten hos massan osv. Eftersom laborationstiden är begränsad så har avsteg från fler än två tester gjorts men om tid hade funnits hade fler funktionella testmetoder givit ett mer mångsidigt resultat.

Vid proportionering och packning av massan har metoden följts och receptet för alla blandningar har följts. Det som skiljer sig vid proportioneringen och blandningen av asfaltmassan är tillförseln av tallbecksolja. Tallbecksoljan blandades med bitumen vid en temperatur på 130 C°. Det har inte gjorts någon analys kring hur tallbecksoljan blandas i bituminet och om det möjligtvis skulle värmas upp till ännu högre temperaturer för att blandas bättre, eller om bituminet ska ha en högre temperatur än tallbecksoljan när blandningen sker. 130 C° valdes då känslan var att både tallbecksoljan och bituminet lätt gick att röra om och blanda, temperaturen har använts vid samtliga tillfällen då bitumen och tallbecksolja blandats.

Vid testning av dynamiskt kryptest togs ett avsteg från metoden då metoden säger att provkropparna ska ha en diameter på 150mm och belastningsplattan 100 mm. Provkropparna som tillverkades vid marshallpackningen får en diameter på 101mm. Anledningen till att 150mm är givet i metoden är att massan ska hålla ihop och inte falla sönder när den belastas, det ska helt enkelt finnas ett kantstöd hos massan när belastningen sker. I detta fall har antagande gjorts att detta inte krävs då massan som valts är en ABT 11 med en god bindemedelshalt och en tät konstruktion. Hade undersökningen genomförts på en massa med mycket högre hålrumshalt och lägre bindemedelshalt hade det kunnat få konsekvenser utan ett kantstöd hos massan runt om belastningsplattan.

Vid inmatning av värden innan testet för dynamiskt kryptest startar så gjordes ett misstag. Datorprogrammet DruckSchwell vill att belastningsplattans diameter ska matas in, där matades istället provkroppens diameter in vilket är felaktigt. Detta leder till en skillnad på ca 5mm vilket i sin tur leder till att belastningen kommer vara något högre och provkroppen deformerar något mer. Deformationsresistens och den permanenta deformationen blir något högre men inte särskilt mycket. Eftersom testningen är i jämförande syfte så påverkas inte diskussionen och slutsatsen bakom resultaten allt för mycket, men bör tas i beaktande vid analys av värdena på deformationen. Utöver dessa 2 avsteg från metoden för dynamiskt kryptest har metoden följts.

Vid testning för styvhetsmodul togs beslutet att endast testa varje provkropp 1 gång dvs inte vända på provkroppen. Detta val har gjorts utifrån att det är svårt

att garantera exakt lika temperatur vid testningen, då provkroppen behöver tas ut och riggas om från värmeskåpet. Om tester på båda sidor görs och man kan garantera lika temperatur så skulle det kunnat påverka resultatet på det sättet att medelvärdet styrks ytterligare, dvs testning på en sida ger något svagare medelvärde. Temperaturen för testning av styvhetsmodul valdes till 10 C°, motiveringen till det är att det historiskt sätt är den normala provtagningstemperaturen.

Vid penetration och mjukpunkt har metoden följts fullt ut, samt vid kontroll av hålrumshalten har densitetsberäkningarna och utförandet följt metodbeskrivningen.

Det är svårt att säga exakt hur mycket tallbecksoljan påverkar penetrationen och mjukpunkt eftersom penetrationstest inte har gjorts på det ursprungliga bituminet för varje blandning. Hade man vetat exakt penetration för tex bitumen 70/100 så har man kunnat se hur mycket penetrationen höjs vid tillförsel av 10% tallbecksolja. Penetrationsresultatet visade på att blandningen 100/150 med 5% tallbecksolja fick en penetration på 180 istället för 160 som resterande blandning fick. Detta kan bero på att penetrationen är högre för ursprungsblandning 100/150 än för 70/100 och 50/70, men vi vet inte hur mycket. Vilket eventuellt hade kunnat undersökts för att få reda på hur tallbecksoljan påverkar penetrationsvärdet.

Testerna är väldigt känsliga framför allt styvhetsmodultesterna där resultatet kan variera med hur provkroppen riggas osv, där den mänskliga faktorn får anses som en möjlig felkälla. Det är också svårt att säkerställa att temperaturen för varje provkropp är exakt lika då testet körs då provkropparna flyttas från tempererat bad eller värmeskåp till testmaskinen, vilket kan påverka resultatet.

En annan felkälla som är viktig att ha med sig är att iblandningen av tallbecksolja i bituminet kan reagera olika och inte vara helt homogent i burken.

Vid proportionering och blandning av asfaltmassan finns alltid risken för separationer vilket påverkar asfaltens funktionella egenskaper. Separationer är dock lättare att undvika på laborationsnivå än i utläggningsprocessen på vägen vanligtvis.

5.3 Slutsatser

Syftet med den här studien är att studera hur tallbecksolja som ersättning av bitumen påverkar den tekniska kvaliteten hos asfaltmassan.

1. Blandningar med tallbecksolja ger likvärdiga effekter på asfaltmassans deformationsegenskaper jämfört med en konventionell blandning.
2. Asfaltmassa med tallbecksolja som tillsats ger jämförbara resultat med en konventionell blandning och får ses som likvärdigt med felmarginalen i beaktning.
3. Mängden tallbecksolja påverkar inte asfaltens egenskaper om lika penetration uppnås enligt resultaten i den här studien.
4. De kravställningar som Trafikverket har på styvhetsmodul och deformation uppfylls till viss del. Kraven som inte uppfylls på deformationsresistensen vid tung trafik är rimligt med hänsyn till det mjuka bindemedel som använts.
5. Tallbecksolja är förnyelsebar men kräver vidare forskning för att undersöka möjligheterna att få räknas som en kolsänka i vägen.

5.4 Vidare studier

Det finns vidare forskning att göra inom biobindemedel och tallbecksolja som tillsats i massan. I den här studien har endast styvhetsmodul och dynamiskt kryptest utförts av de funktionella mätmetoderna som finns. Det bör i framtiden undersökas hur tallbecksolja som tillsats påverkar nötningsresistensen, vattenkänsligheten, åldringsbeständigheten och utmattningsegenskaperna bland annat. Eftersom asfalt är väldigt temperaturberoende så behöver fler tester göras vid olika temperaturer och undersöka hur tallbecksolja påverkas av det jämfört med konventionella blandningar.

Det behöver också göras mer forskning kring tallbecksolja i återvinnings syfte och om man kan garantera 100% återvinning och räkna tallbecksolja som

biogent kol i vägen. Bindemedelstester som gjorts visar på goda återvinningsmöjligheter hos biobindemedlet, men det behöver även forskas kring hur det rent praktiskt går att utveckla dagens återvinningsprocesser för att garantera så hög återvinning som möjligt.

Vidare forskning behöver också göras kring hur man kan minska tillverkningsutsläppen av råttolja och tallbecksolja. För att kunna börja använda tallbecksolja som bindemedel krävs också att man kan säkerställa en god arbetsmiljö för alla inblandade. Det behöver också göras studier och utredningar på hur det rent praktiskt ska gå smidigt och bra att tillföra rätt mängd tallbecksolja i blandaren på asfaltverket och hur det kan styras ihop med olika recept.

6 Referenser

Agardh, S. Universitetslektor vid trafik och väg LTH (2021) muntlig föreläsning 2021-02-04.

Agardh, S., & Parhamifar, E. (2014). Vägbyggnad. Liber AB. Stockholm.
Granhage, L. (2009). Kompendium vägbyggnad. Chalmers. Göteborg. (Elektronisk)

Arizona Chemical AB. (2017) Till miljö och energidepartementet. Sandarne. (Elektronisk)

Boverket (2021) Introduktion till livscykelanalys (LCA).
<https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/>. Nerladdat: 2022-03-23

Eurobitume (U.Å) Testing. Nerladdat 2022-03-20
<https://www.eurobitume.eu/technical/testing/>

Fröberg, K och Strömgren, S. (1995) FAS Asfaltsbok (Kapitel 1 Inledning och historik). FAS. Stockholm.

Fröberg, K, Strömgren, S, Stjernberg H. (1999) Asfaltsboken (Kapitel 1 Inledning och historik). Asfaltsskolan. Stockholm. (Elektronisk)

Hultqvist, B och Göransson, N (1993) Provning av mekaniska egenskaper hos marshallprovkroppar. Väg och Trafik-institutet Linköping. (Elektronisk)

Höbeda, P. (1994). Inverkan av filler på egenskaper hos asfaltbetong. Väg och transport - forskningsinstitutet. Linköping. (Elektronisk)

Imeri, L och Maka, N. (2021) Ligning i bindemedel för hållbara asfaltsbeläggningar. Lunds universitet. Lund. (Elektronisk)

Ingrassia, P, I. (2020). Advanced experimental characterization of bituminous binders extended with renewable materials in asphalt pavements. Università Politecnica delle Marche. Ancona. (Elektronisk)

Jansson, H och Said, S. (2001) Töjningskriterier tunna beläggningar. Väg- och transport-forskningsinstitutet. Linköping. (Elektronisk)

- Jönsson, O. P, Sillén, B, Ulmgren, N. (1999) Asfaltsboken (Kapitel 8 Proportionering och funktionella egenskaper). Asfaltsskolan. Stockholm. (Elektronisk)
- Kvarnström, T. (2009) Fasa ut sista oljan. Svensk fjärrvärme. Stockholm. (Elektronisk)
- EL Kättström, D. (2019) Oljekraft. <https://el.se/oljekraft>. Nerladdad: 2022-03-23
- Löwhagen, Linda. (2022) Livscykelanalys asfalt. NCC Industry. Upplands Väsby. (Elektronisk)
- Mossberg, J. (U.Å) Bioraffinaderi producerar framtidens biobaserade produkter. Nerladdat 2022-03-28 <https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/amnesomraden/bioraffinaderi>
- Novotny, M. Energimyndigheten. (2020). Lignin – en restprodukt redo för nya användningsområden. <https://www.energimyndigheten.se/arkiv-for-resultat/Resultat/lignin-en-restprodukt-redo-for-nya-anvandningsomraden/>
Nedladdad: 2022-03-17
- Olsson, B. (2012) Biooljeprojekt för Umeå Energi AB. Umeå Universitet. Umeå. (Elektronisk)
- Olsson, K, Ulmgren, N, Granlund, J. (1999) Asfaltsboken (Kapitel 9 Funktionella egenskaper). Asfaltsskolan. Stockholm. (Elektronisk)
- Porot, L och Haslam, B. (2020) Pitch in bitumen application Supportive data for record of Invention. Kraton. Sandarne. (Elektronisk)
- Redelius. (1995) FAS Asfaltsbok (kapitel 5 Bindemedel). FAS. Stockholm.
- Södra (2021) Skogens förnybara mångsysslare. Nerladdad: 2022-03-23 <https://www.sodra.com/sv/se/bioprodukter/tallolja/>
- Swedegas (2018) Biogas – Grön energi. Nerladdad 2022-03-28 <https://www.swedegas.se/gas/biogas/nyttan-med-biogas>
- SCA (U.Å) Frågor och svar bioraffinaderi. Nerladdat 2022-03-28 <https://www.sca.com/sv/fornybar-energi/projekt-och-utveckling/bioraffinaderi/fragor-och-svar/>

SCA Biorefinery Östrand AB (2018) Samrådsunderlag för ett bioraffinaderi vid Östrands industriområde, Timrå kommun. Nerladdat 2022-03-29
<https://www.sca.com/globalassets/fornybar-energi/handlingar/bioraffinaderi/samradsunderlag-bioraffinaderi-ostrand-6-mars-2018.pdf>

Ståhle, P. (2015) Introduktion till hållfasthetslära. Lunds universitet. Lund. (Elektronisk)

Saidi, A och Begzad, G. (2021) Fallvänlig asfalt för gång- och cykelbana. Lunds universitet. Lund. (Elektronisk)

SBUF (2001) Ergonomi för asfaltspersonal. SBUF (Elektronisk)

Swedish standard institute (2006) Miljöledning – Livscykelanalys – Principer och struktur. (Elektronisk)

Trafikverket. (2021). TRVINFRA-00224. Trafikverket. Borlänge.

Trafikverket. (2020). Bitumenbundna lager TDOK 2013:0529. Trafikverket. Borlänge.

Trafikverket (2014) Val av beläggning. Borlänge. (Elektronisk)

Trafikverket (1998) Bestämning av styvhetsmodul hos asfaltbetong genom pulserande pressdragprovning. Borlänge. (Elektronisk)

Trafikverket (2000) Bestämning av deformationsresistans med dynamiskt kryptest. Borlänge. (Elektronisk)

Trafikverket. (2011). TRVK Väg TDOK 2011:264. Trafikverket. Borlänge.

Trafikverket. (2011). TRVK Väg TDOK 2011:267. Trafikverket. Borlänge.

Whiteoak, D. (1990) The shell bitumen handbook. University of Nottingham. Nottingham.

7 Bilagor

7.1 Bilaga 1 Bindemedelshalt, minimum i viktprocent.

Bindemedelstyp	ABT 4	ABT 6	ABT 8	ABT 11	ABT 16	ABT 22
50/70	-	-	6,6	6,4	6,2	6,0
70/100	-	-	6,4	6,2	6,0	5,8
100/150	6,6	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6
160/220	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6	5,4
330/430	-	-	-	5,6	5,4	5,2

7.2 Bilaga 2 Andel passerande i viktprocent

Sikt (mm)	ABT 4	ABT 6	ABT 8	ABT 11	ABT 16	ABT 22
45	-	-	-	-	-	-
31,5	-	-	-	-	-	100
22,4	-	-	-	-	100	90-100
16	-	-	-	100	90-100	70-90
11,2	-	-	100	90-100	71-88	57-79
8	-	100	90-100	70-88	57-73	47-70
5,6	100	90-100	-	-	-	-
4	90-100	70-95	60-78	48-66	-	-
2	50-75	47-72	41-60	33-52	26-47	24-42
0,5	20-32	20-32	18-34	16-31	13-30	12-25
0,063	7-11	7-12	6-10	6-9	6-9	5-9

7.3 Bilaga 3 Hålrumsintervall Marshall (Vol-% Min – Max).

Bindemedelstyp	ABT 4	ABT 6	ABT 8	ABT 11	ABT 16	ABT 22
50/70	-	-	2,0-4,0	1,5-3,5	1,5-3,5	1,5-3,5
70/100	-	-	2,0-4,0	1,5-3,5	1,5-3,5	1,5-3,5
100/150	2,0-4,0	2,0-4,0	2,0-4,0	1,5-3,5	1,5-3,5	1,5-3,5
160/220	2,0-4,0	2,0-4,0	2,0-4,0	1,5-3,5	1,5-3,5	1,5-3,5
330/430	-	-	-	1,5-3,5	1,5-3,5	1,5-3,5

7.4 Bilaga 4 Penetrationstest

Blandning	Nål 1	Nål 2	Nål 3	Medelvärde
100/150 5% TOP	165	165	160	163
70/100 10% TOP	163	160	164	162
50/70 15% TOP	155	156	159	157

7.5 Bilaga 5 Skrymdensitet

Blandning 1	Provkropp	Torr-vikt (g)	Vatten-vikt (g)	Skrymdensitet (g/cm ³)
	1	1190,4	700,6	2,4231129114
	2	1206,9	711,3	2,4279486864
	3	1234,4	727,6	2,4283921547
Blandning 2	1	1187,3	698,7	2,4227383811
	2	1188	700,5	2,4296366769
	3	1193,4	702	2,42131
Blandning 3	1	1207,7	712,8	2,4329944979
	2	1184,5	696,9	2,4219818396
	3	1185	696,9	2,4205221266
Blandning 4	1	1200,7	706,2	2,4208491547
	2	1198,5	705,3	2,4227828163
	3	1191,9	700,4	2,4177746063

7.6 Bilaga 6 Kompaktdensitet

Blandning	Provkropp	Pyk (g)	Pyk+ massan (g)	Pyk+ massan+ vatten (g)	Pyk volym (cm ³)	Kompaktdensitet (g/cm ³)
Blandning 160/220	1	979,9	2179,5	3061,7	1368,8	2,478
	2	958,1	2153,9	3031,1	1362	2,480
	3	973,8	2162	3059,6	1378	2,487
Blandning 100/150 + 5 % TOP	1	951,8	2155,8	3013,4	1344,8	2,484
	2	956,7	2141,2	2998,7	1338,7	2,474
	3	984,3	2166	3021,5	1335,6	2,474
Blandning 70/100 +10% TOP	1	1180	2369,5	3206,6	1321,7	2,466
	2	1177	2379,3	3210,3	1321,1	2,466
	3	960	2190,5	3040,2	1348,5	2,479
Blandning 50/70 + 15% TOP	1	985,3	2168,6	3029,1	1340,6	2,478
	2	960	2142,6	3011,4	1348,5	2,478
	3	979,9	2168,6	3054,4	1368,8	2,474

7.7 Bilaga 7 Dynamiskt kryptest

160/220	Provkropp	Deformationsresistens	Permanent deformation (mm)
160/220	1	17 247	1,069314
	2	15 081	0,935022
	3	14 629	0,906998
100/150 5% Tallbecksolja	1	19 113	1,185006
	2	23 371	1,449002
	3	19 517	1,17102
70/100 10% Tallbecksolja	1	14 226	0,882012
	2	15 919	0,986978
	3	15 161	0,939982
50/70 15% Tallbecksolja	1	13 806	0,855972
	2	15 387	0,953994
	3	16 145	1,00099

7.8 Bilaga 8 Styvhetsmodul

160/220 0% Tallbecksolja	Provkropp	Styvhetsmodul MPa (genomsnitt 5 pulser)
	1	8527
	2	8518
	3	8129
100/150 5% Tallbecksolja	1	6164
	2	6524
	3	5937
70/100 10% Tallbecksolja	1	7028
	2	7352
	3	6776
50/70 15% Tallbecksolja	1	7259
	2	6456
	3	6767