

Effekten av å tilsette tre ulike rejuvenatorer på egenskapene i aldret bitumen.

Tawab Fidai



Masteroppgave i veg

Innlevert: 3 mai 2021

Hovedveileder: Inge Hoff, Institutt for bygg og miljøteknikk

Medveileder: Bjørn Ove Lurfald, Institutt for bygg og miljøteknikk/Veidekke Industri AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2021 i forbindelse med avsluttende utdanning ved Fakultetet for Ingeniørvitenskap ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Jeg har i denne oppgaven tatt for meg et omfattende tema. Bakgrunnen for å velge tema baserer seg på min egen nysgjerrighet og interesse for å lære mer om bruk av rejuvenatorer i gjenbruk av asfalt. Det har til tider vært utfordrende å jobbe med masteroppgaven, men også veldig spennende og lærerikt.

Jeg vil først og fremst rette en stor takk til min hovedveileder Inge Hoff, professor ved Institutt for bygg og miljøteknikk, Xuemei Zhang, PhD-stipendiat ved NTNU og Jan Erik Molde, avdelingsleder ved Institutt for bygg og miljøteknikk. Dere har under hele prosessen vært hjelpsomme med mange gode råd og tilbakemeldinger som har hjulpet meg med å holde motivasjonen oppe og jobbe godt med oppgaven.

I tillegg vil jeg rette en stor takk til min medveileder Bjørn Ove Lørfald, Professor ved Institutt for bygg og miljøteknikk og leder av Kompetansesenter i Veidekke Industri AS for gode råd, tilbakemeldinger og uvurderlig støtte med utførelse av deler i det eksperimentelle arbeidet som ble utført av Else Marit Småvik ved Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS.

Sist, men ikke minst ønsker jeg å takke familie og venner for deres støtte, forståelse, tålmodighet og engasjement under hele prosessen.

Signert av: Tawab Fidai

Dato: 03.05.2021

Sammendrag

Norge har gjennom «Den europeiske økonomiske (EØS)»-avtalen pliktet seg til å gjenvinne større mengder avfall fra bygg og anleggsprosjekter. Under denne gruppen kommer også gjenbruk av materialer fra veier. I Norge er man allerede flinke på å gjenbruke asfalt som ubundet gjenbruk, men Statens vegvesen er mer konservativ for å gjenbruke høye andeler av resirkulert asfalt i nytt dekke på høytraffikerte veier. Dette er i hovedsak fordi aldret bitumen, i resirkulert asfalt har blitt stiv gjennom en naturlig aldresprosess, som gjør den utsatt for lavtemperaturoppsprekking. For å hjelpe med å løse dette problemet har denne undersøkelsen sett på effekten av tre ulike rejuvenatorer blandet med aldret bitumen for å gjenopprette bindemiddelegenskapene til et fersk 70/100 bitumen.

Metoden som er brukt i denne oppgaven er delt opp i en eksperimentell del og et litteraturstudium. I den eksperimentelle delen ble tre ulike rejuvenatorer blandet med 50 % av et aldret bitumen og 50 % av ferskt 70/100 bitumen. Videre har alle prøvene blitt testet for deformasjonsmotstand og utmatting i Dynamisk Skjær Reometer (DSR), mykningspunkt-test og lavtemperatur-egenskaper gjennom Fraass bruddpunkt. Alle tre testene har blitt gjennomført før aldring, etter kortidsaldring og etter langtidsaldring for å vurdere endringer på bindemiddelegenskaper. Samtidig har alle testene også blitt gjennomført for en referanseprøve av 70/100 bitumen for å kunne sammenligne resultatene av bindemiddelegenskapene med rejuvenatorprøvene. Litteraturstudiet ble utført for å sammenligne resultatene opp mot andre undersøkelser som har sett på effekten av ulike rejuvenatorer i aldret bitumen.

Generelt har det blitt observert forbedret eller nesten tilsvarende lavtemperatur-egenskaper for de tre rejuvenator-prøvene sammenlignet med referanseprøven av 70/100 bitumen. På den andre siden var det en del variasjon i mykningspunkt og deformasjonsmotstanden mellom de ulike rejuvenator-prøvene sammenlignet med referanseprøven. I tillegg ble ikke alle bindemiddelkravene som var testet oppfylt i forhold til krav i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018). Noe av dette skyldes menneskelige feilkilder, mens andre forhold er knyttet opp mot kvaliteten på estimering av rejuvenator-mengden for å oppnå like bindemiddelegenskaper som referanseprøven.

Abstract

Through the “European Economic Area (EEA)”- agreement, Norway has committed itself to recycling large amounts of waste from construction and civil engineering projects. Recycling of road materials could be included in this group. Norway is already good at reusing asphalt-material in unbound layers of the road, but the Norwegian Public Roads Administration is more conservative in reusing high percentages of asphalt material in new pavement for high-traffic roads. This is mainly because aged bitumen is stiff, due to a natural ageing process that can make it prone to low-temperature cracking. To help solve this problem, this study investigates the effect of three different rejuvenators mixed with the aged bitumen to restore the binder properties of a fresh 70/100 bitumen.

The method used in this thesis is divided into an experimental and literature study. In the experimental part, the three different rejuvenators have been mixed with 50 % aged bitumen and 50% fresh 70/100 bitumen. All these samples have been tested for deformation- and fatigue resistance in Dynamic Shear Rheometer (DSR), softening point test and low-temperature cracking resistance through the Fraas breaking point. All three tests have also been performed before ageing, after short-term ageing and after long-term ageing to assess the changes in binder properties. At the same time, all the tests mentioned have also been carried out for a reference sample of fresh 70/100 bitumen to compare the results with the rejuvenator-samples. The literature study was conducted to compare the results in this thesis against other studies that have also looked at the effect of different rejuvenators in aged bitumen.

In general, the three rejuvenators added in the aged bitumen have improved or almost showed equivalent low-temperature cracking resistance compared to the 70/100 bitumen. On the other hand, there was some variation in the softening point and deformation-resistance in the DSR between the different rejuvenator-samples compared to the reference sample. In addition, not all the rejuvenator-samples fulfilled the requirements in relation to the Norwegian Public Roads Administration handbook «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) . Some reasons could be connected to human errors, while other factors are connected to the quality of estimating the rejuvenator-amount to achieve the same binder properties as the 70/100 bitumen.

Innholdsfortegnelse

Forord	3
Sammendrag	4
Abstract.....	5
Innholdsfortegnelse.....	6
Figuroversikt	9
Tabelloversikt.....	12
Kapittel 1: Introduksjon.....	13
1.1 Mål og forskningsspørsmål	15
1.2 Oversikt over arbeidet i masteroppgaven.....	16
Kapittel 2: Litteraturstudie	17
2.1 Veikonstruksjon	17
2.1.1 Oppbygging av veikonstruksjonen	17
2.2 Grunnleggende faktorer ved dimensjonering av dekkekonstruksjoner.....	18
2.1.2 Veidekket og dekkeegenskaper	18
Sporutvikling i asfaltdekket	19
Lavtemperatur oppsprekking	22
2.3 Bitumen.....	22
2.3.1 Oppbygging av bitumen	22
2.3.2 Naturlig og raffinert bitumen	22
2.3.3 Egenskaper til bitumen.....	24
Vedheft.....	24
Konsistens	24
Bestandighet.....	25
2.3.3.4 Modell for fysikalske egenskaper ved bitumen	25
2.3.4 Bindemiddeltyper	28
Bitumen.....	28
Skumbitumen	28
Bitumen Test Data Chart.....	28
2.4 Gjenbruksasfalt.....	29
2.4.1 Definisjon av begrepet gjenbruksasfalt (Gja)	29
2.4.2 Bruksområde for gjenbruk av asfalt.....	30
Gjenbruk i ordinære asfalttyper	30

Ubunden bruk (Ak).....	30
2.4.3 Produksjonsmetode for gjenbruksasfalt (Gja)	31
Varm gjenbruksasfalt produsert i blandeverk.....	31
2.5 Rejuvenatorer	32
2.5.1 Definisjon av begrepet rejuvenator	32
2.5.2 Effekten av rejuvenatorer i aldret bitumen.....	33
2.5.3 Gunstig rejuvenator-mengde i aldret bitumen basert på bindemiddeltester	33
2.5.4 Valg av rejuvenator i aldret bitumen	34
Kapittel 3: Teori og metode for laboratoriearbeidet.....	36
3.1 Bituminøse bindemidler.....	36
3.2 Analyse av bitumen basert på Strategic Highway Research Program («SHRP»)	37
3.3 Penetrasjon	38
3.4 Mykningspunkt	40
3.5 Fraass bruddpunkt	43
3.6 Viskositet.....	44
3.6.1 Kinematisk viskositet.....	45
3.6.2 Dynamisk viskositet.....	47
3.7 Dynamisk Skjær Reometer	48
3.8 Aldringsforsøk.....	51
3.8.1 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	51
3.8.2 Pressure Aging Vessel Test (PAV).....	53
Kapittel 4: Eksperimentelt arbeid.....	55
4.1 Beskrivelse av produktene	55
4.2 Beskrivelse av bindemiddelbehov i det eksperimentelle arbeidet.....	56
4.3 Estimering av rejuvenator-mengden basert på viskositet til prøvene.....	57
4.4 Beregning av rejuvenator-mengden basert på dynamisk viskositet ved 60 grader celsius	59
4.5 Beskrivelse og resultater av forarbeidet ved gjennomføring av bindemiddeltester for å bestemme rejuvenator-mengdene	60
4.6 Endelige rejuvenator-mengder.....	65
Kapittel 5: Diskusjon og resultater fra det eksperimentelle arbeidet.....	66
5.1 Bindemiddelresultater og diskusjon før aldringsforsøk.....	67
5.1.1 Mykningspunkt før aldring	67
5.1.2 Fraass bruddpunkt før aldring	68
5.1.3 Kompleksmodul og fasevinkel før aldring	70
Motstand mot permanent deformasjon før aldring.....	72

Temperaturgrense basert på «SHRP»- bindemiddelspesifikasjonen før aldring.....	73
5.2 Bindemiddelresultater og diskusjon etter kortidsaldring	74
5.2.1 Mykningspunkt etter kortidsaldring	74
5.2.3 Kompleksmodul og fasevinkel etter kortidsaldring	76
Motstand mot permanent deformasjon etter kortidsaldring	78
Temperaturgrense basert på «SHRP»-bindemiddelspesifikasjonen etter kortidsaldring.....	79
5.3 Bindemiddelresultater og diskusjon etter langtidsaldring.....	80
5.3.1 Mykningspunkt etter langtidsaldring	80
5.3.2 Fraass bruddpunkt etter langtidsaldring	81
5.3.3 Kompleksmodul og fasevinkel til de ulike prøvene etter langtidsaldring	82
5.3.3.1 Motstand mot permanent deformasjon etter langtidsaldring	84
5.3.3.2 Utmatting.....	85
5.4 Utfordringer med å bruke rejuvenatorer og aldret bitumen i øvre dekkelag på høytrafikkerte veger	86
5.4.1 Utfordringer med å dokumentere og oppfylle alle kravene.....	86
5.4.2 Utfordringer med å relatere resultatene i laboratoriet sammenlignet feltforsøk.	87
5.5 Fordeler med å bruke rejuvenatorer og aldret bitumen i øvre dekkelag på høytrafikkerte vegger	87
5.5.1 Miljøvennlige fordeler med å bruke rejuvenatorer i gjenbruksasfalt.....	87
5.5.2 Økonomisk fordeler med å bruke rejuvenatorer i gjenbruksasfalt	89
Kapittel 6: Konklusjon.....	90
Kapittel 7: Anbefaling for fremtidige undersøkelser	91
Bibliografi	92
Vedlegg 0 – Resultater fra Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS sin ekstraksjon av gjenbruksasfalt.....	95
Vedlegg 1: Resultater fra penetrasjonstesten for alle prøvene	97
Vedlegg 2: Resultater fra mykningspunkt-testen for alle prøvene.....	98
Vedlegg 3: Resultater fra Fraass bruddpunkt for alle prøvene.....	100
Vedlegg 4: Resultater fra DSR for et bitumen på 70/100 i forarbeidet	102
Vedlegg 5: Ordforklaring	103

Figuroversikt

Figur 1 1: Flytdiagram som viser oppsummering av arbeidet med masteroppgaven.	16
Figur 2. 1: Overbygning med asfaltdekket på telefarlig grunn.	17
Figur 2. 2: Minimum lagtykkelse er to ganger øvre siktstørrelse for steinmaterialet i massen (Statens vegvesen, 2014a).	19
Figur 2. 3: Spor på grunn av slitasje (Bakløkk, 2013).	20
Figur 2. 4: Forskjellige former for spordannelse på grunn av konsolidering (Bakløkk, 2013).	20
Figur 2. 5: Spor på grunn av plastiske skjærdeformasjoner i dekket (Bakløkk, 2013).	21
Figur 2. 6: Oversikt over ulike faktorerers innvirkning på deformasjonsmotstanden (Bakløkk, 2013).	21
Figur 2. 7: Fremstilling av bitumen ved destillasjon av råolje (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).	23
Figur 2. 8: Bitumens viskøse egenskaper (Andersen, 1995).	26
Figur 2. 9: Komponenter av responsen til et viskoelastisk materiale i et krypforsøk (Andersen, 1995).	27
Figur 2. 10: Shell bitumen Test Data Chart (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).	29
Figur 2. 11: Begrensning av tilsetning av resirkulert asfalt i andel vekt-% av total masse (KFA, 2019c).	30
Figur 2. 12: Eksempel av prosessen involvert i resirkulering av varm gjenbruksasfalt i sentral verk (Hoff, 2020).	31
Figur 2. 13: Eksempel av blandediagram for en gitt rejuvenator og aldret bitumen (EAPA, 2018).	34
Figur 2. 14: Eksempel på flytdiagram for mulig prosedyre for å evaluere rejuvenatorer (EAPA, 2018).	35
Figur 3. 1: Krav til penetrasjonsgradert veibitumen (Statens vegvesen, 2018).	36
Figur 3. 2: Performance Graded Asphalt Binder Specifications (Andersen, 1995).	38
Figur 3. 3: Penetrasjonsforsøket (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og penetrasjonsapparatet på NTNU.	39
Figur 3. 4: Tillatt avvik mellom enkeltmålinger (Statens vegvesen, 2014b)	39
Figur 3. 5: Penetrasjonsforsøk med vannbad (venstre bilde), Termometer (midterste bilde) og penetrasjonslodd med nål (høyere bilde).	40
Figur 3. 6: Venstre bilde viser mykningspunktapparat (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og høyere bilde er mykningspunktapparat på NTNU.	41

Figur 3. 7: Venstre bilde viser kulene på ringen før testing og høyere bilde viser når kulene treffer bunnen samtidig.	42
Figur 3. 8: Venstre bilde viser horisontalt bitumen overflate og høyre bilde viser bitumenprøvene, kulene, magneten, mykningspunktapparatet og glassrøret med vann plassert i et kjøleskap.....	42
Figur 3. 9: Fraass-apparat for bestemmelse av bruddpunkt (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).	43
Figur 3. 10: Ulike metoder for å måle viskositet(Andersen, 1996).....	45
Figur 3. 11: Cannon-Fenske kapillarviskosimeter (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).....	46
Figur 3. 12: Måling med dynamisk viskositet med rotasjonsviskosimeter (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).	47
Figur 3. 13: Virkemåte for Dynamisk Skjær Reometer (Andersen, 1995).	49
Figur 3. 14: Dynamisk Skjær Reometer apparat med ring og bitumenprøve.	50
Figur 3. 15: Prinsippskisse (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).	52
Figur 3. 16: Bilde av fremgangsmåten for Rolling Thin Film Oven apparat, innsiden av apparatet og bitumen i glassene før og etter RTFOT.	52
Figur 3. 17: Tap av bitumen i glass etter RTFOT testen.	53
Figur 3. 18: Kompleksmodul som funksjon av frekvens for et bindemiddel i ikke aldring tilstand, i trykkaldring tilstand og gjenvunnet etter 8 års felteksponering (Andersen, 1995). ..	54
Figur 3. 19: Figur av bitumen beholder og trykkaldringskammer.	54
Figur 4. 1: Rejuvenatorene A, B og C.	55
Figur 4. 2: Interpolert verdi for dynamisk viskositet basert på penetrasjonsverdi fra aldring bitumen i punkt E (farget rødt).....	59
Figur 4. 3: Aldret og ferskt bitumen fordelt i mindre prøvebeholdere.	61
Figur 4. 4: Gunstig mengde av Rejuvenatoren A for å oppnå penetrasjonsgrad på 70/100 i aldring bitumen.	64
Figur 5. 1: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur før aldring.	71
Figur 5. 2: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur før aldring.	72
Figur 5. 3: Motstand mot permanentdeformasjon før aldring.	73
Figur 5. 4: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur etter kortidsaldring.	77
Figur 5. 5: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur etter kortidsaldring.	78
Figur 5. 6: Motstand mot permanent deformasjon etter kortidsaldring.	79
Figur 5. 7: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur etter langtidsaldring.....	83
Figur 5. 8: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur etter langtidsaldring. ..	84

Figur 5. 9: Motstand mot permanent deformasjon etter langtidsaldring.	85
Figur 5. 10: Utslipp per tonn av ferskt og gjenbruksasfalt (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016).	88
Figur 5. 11: Materialrelaterte kostnader ved varm behandling i resirkulerte asfalt (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016).....	89

Tabelloversikt

Tabell 4. 1 Oversikt over bindemiddelbehov for de ulike testene i forarbeidet.	56
Tabell 4. 2: Oversikt over dynamisk viskositet ved 60 grader celsius for de ulike produktene.	58
Tabell 4. 3: Mengdeforhold for aldret bitumen blandet med bare rejuvenator, 70/100 bitumen og aldret bitumen (Gjb) gitt i gram. I tillegg er kravene for penetrasjon og mykningspunkt hentet fra Statens vegvesen håndbok « N200 » (Statens vegvesen, 2018).....	63
Tabell 4. 4: Endelig rejuvenator-mengder i % i forhold til vekten av aldret bitumen.	65
Tabell 5. 1: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene før aldring. 68	
Tabell 5. 2: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene før aldring.....	69
Tabell 5. 3: Temperaturgrense basert på « SHRP »-bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) før aldring.....	74
Tabell 5. 4: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter kortidsaldring.....	75
Tabell 5. 5: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter kortidsaldring.....	76
Tabell 5. 6: Temperaturgrense basert på « SHRP »- bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) etter kortidsaldring.	80
Tabell 5. 7: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter langtidsaldring.....	81
Tabell 5. 8: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter langtidsaldring.....	82
Tabell 5. 9: Beregnet utmatting for de ulike bitumenprøvene etter langtidsaldring.	86

Kapittel 1: Introduksjon

Norge har gjennom EØS-avtalen sluttet seg til EUs rammedirektiv for avfall i 2008/98/EC (KFA, 2019a). Dette direktivet har som mål å minske avfallsmengden tilknyttet for eksempel gjenbruk av asfalt. I tillegg legger direktivet opp til at minimum 70% av bygg og riveavfallet skal gjenbrukes eller gjenvinnes innen 2020 (KFA, 2019a). Vei-infrastruktur går under denne kategorien og det er ønskelig å bruke gammelt asfalt på nye vegger.

I 2019 var forholdet mellom anvendt og deponert returafalt lik 97.8 % (KFA, 2019a) i Norge. Samtidig kan det ligge returafalt på mellomlager som fører til at man noen år kan ha en gjenbruksprosent som er høyere enn 100 %.

Asfalt består av omtrent 95 % steinmaterialet og 5 % bitumen. Mesteparten av materialet i asfalten blir brukt til ubunden bruk og ikke som høykvalitet materialet i nytt dekke. For eksempel ble cirka 70 % av returafalt i 2019 benyttet i ubundet gjenbruk (KFA, 2019a). Bruksområder for gjenbruksasfalt har vært som midlertidig anleggsveier, dekke på hytteveier og til kantfyllinger. Derimot er det ønskelig å gjenbruke bitumen og høy kvalitet steinmaterialet i nytt dekke på høytrafikkerte vegger, fordi disse materialene er begrensede ressurser. Samtidig vil det bli økte kostander og mer utslipp av CO₂ ved å produsere nytt steinmaterialet og nytt bitumen i et raffineri. For eksempel er man i Nederland helt avhengig av import av steinmaterialet (Hoff, 2020). I tillegg vil økte priser av olje øke behovet for å resirkulere og gjenbruke aldret bitumen.

En måte å produsere gjenbruksasfalt på er ved varm produksjon. I denne prosessen blir asfaltgranulat varmet opp og deretter tilsettes ferske masser. I 2019 ble omtrent 7 % (KFA, 2019a) returafalt anvendt i varm produksjon i Norge. Den lave bruken av returafalt i varmt verk skyldes trolig en kombinasjon av strengere dokumentasjonskrav fra Statens vegvesen og begrenset med asfaltfabrikker som kan resirkulere høye andeler gjenbruksasfalt (Hoff, 2020). For eksempel er det satt varierende grad av maksimal tilsatt andel resirkulert asfalt i nytt dekke gitt i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) , som er avhengig av tilsatt bindemiddel, massetype, trafikkmengde og produksjonsmetode. Hvis mengden gjenbruksasfalt overstiger 10 % i dekke må man også fastsette

bindemiddelkvaliteten i gjenbruksmassen og dokumenter flere forhold som mengden forurensningsstoffer (Statens vegvesen, 2018).

For å gjenbruke asfalt kreves det at bindemiddelet ikke er for stivt. Dette er fordi det gamle bindemiddelet har vært utsatt for oksidasjon og gjør det stivere (KFA, 2019c). Samtidig blir molekyl-strukturen endret ved tap av grunnstoffer som Oksygen (O) eller Hydrogen (H) (Cavalli *et al.*, 2017). Dette kan gi økt fare for lavtemperatur - oppsprekking når det er hurtige temperaturvariasjoner over tid (Zaumanis *et al.*, 2014; Hoff, 2020).

For å mykne opp bindemiddelet tilsettes såkalte «oljer» som heter rejuvenatorer. De har som oppgave å redusere stivheten i bindemiddelet og gjenopprette de reologiske egenskapene og dermed gi mulighet for 100 % resirkulering (Zaumanis *et al.*, 2014). På tross av de økonomiske og miljøfordelene med å bruke slike rejuvenatorer blir de sjeldent brukt på øvre dekkelag i høytrafikkerte veger i Norge.

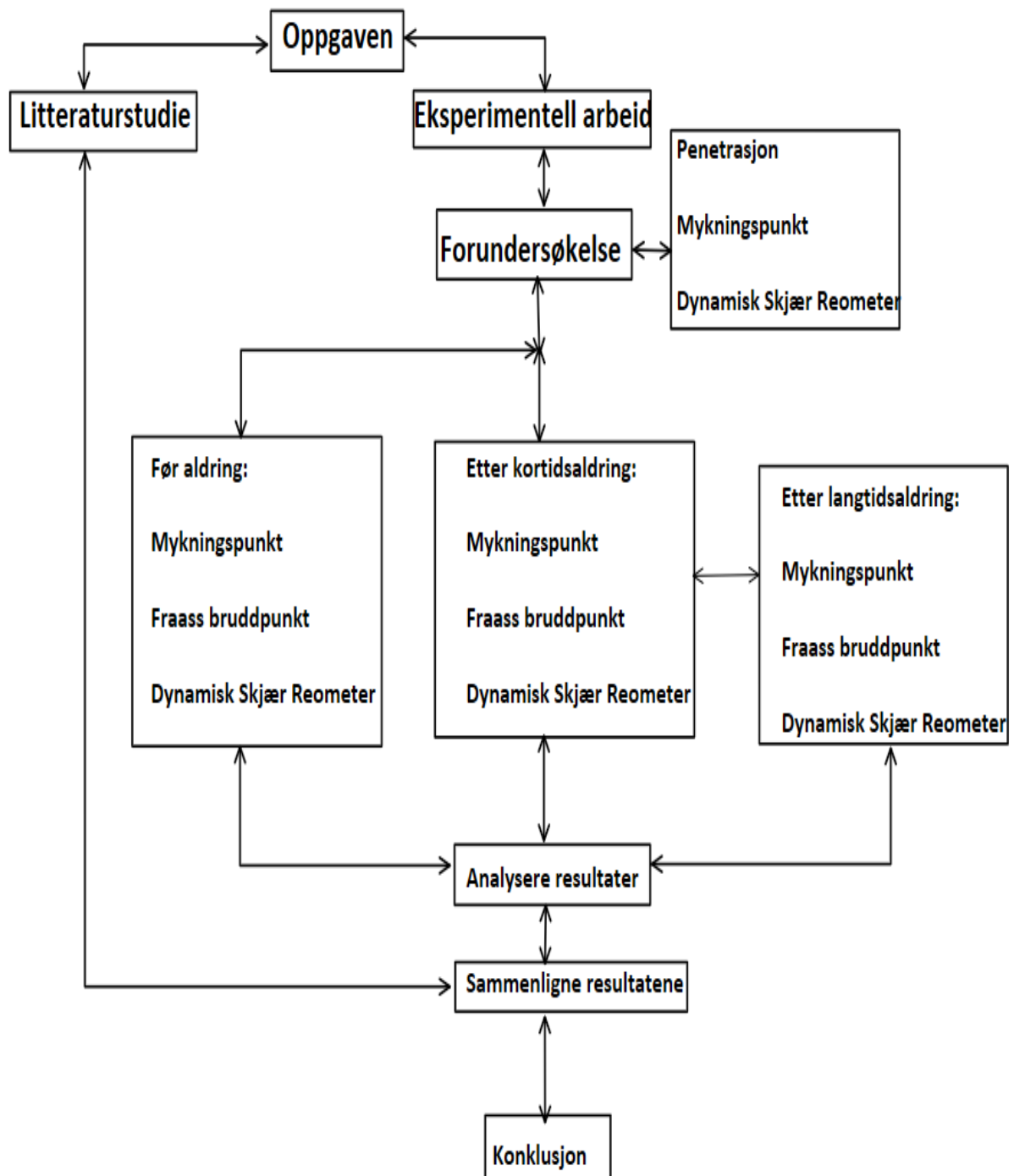
1.1 Mål og forskningsspørsmål

Målet for denne masteroppgaven er å undersøke om tre ulike rejuvenatorer blandet med et aldret bitumen kan gjenopprette de samme bindemiddelegenskapene som et ferskt 70/100 bitumen og bruke det i dekke på høytrafikkerte veier. For å gjøre arbeidet mulig å fullføre innenfor den avgrensede tiden vil denne masteroppgaven undersøke noen aspekter ved bindemiddelegenskapene. Disse utgjør deformasjonsmotstand, lavtemperatur-egenskaper og effekten av aldring på bindemiddelegenskapene som er noen utfordringer med å bruke et resirkulert bitumen. Denne masteroppgaven vil dermed ikke gi et fullstendig svar på om målet kan realiseres. Dette målet kan omformes til følgende forskningsspørsmål:

- Hvordan vil effekten av tre ulike rejuvenatorer blandet i aldret bitumen påvirke bindemiddelegenskapene sammenlignet med et referansebitumen på 70/100 gjennom aldringsforsøk?

1.2 Oversikt over arbeidet i masteroppgaven

Helle arbeidet i masteroppgaven er oppsummert i Figur 1.1. Det ble utført et litteraturstudium i prosjektarbeidet før det eksperimentelle-arbeidet startet. Deretter ble alle forsøkene utført og til slutt ble alt knyttet sammen til en sluttrapport.



Figur 1 1: Flytdiagram som viser oppsummering av arbeidet med masteroppgaven.

Kapittel 2: Litteraturstudie

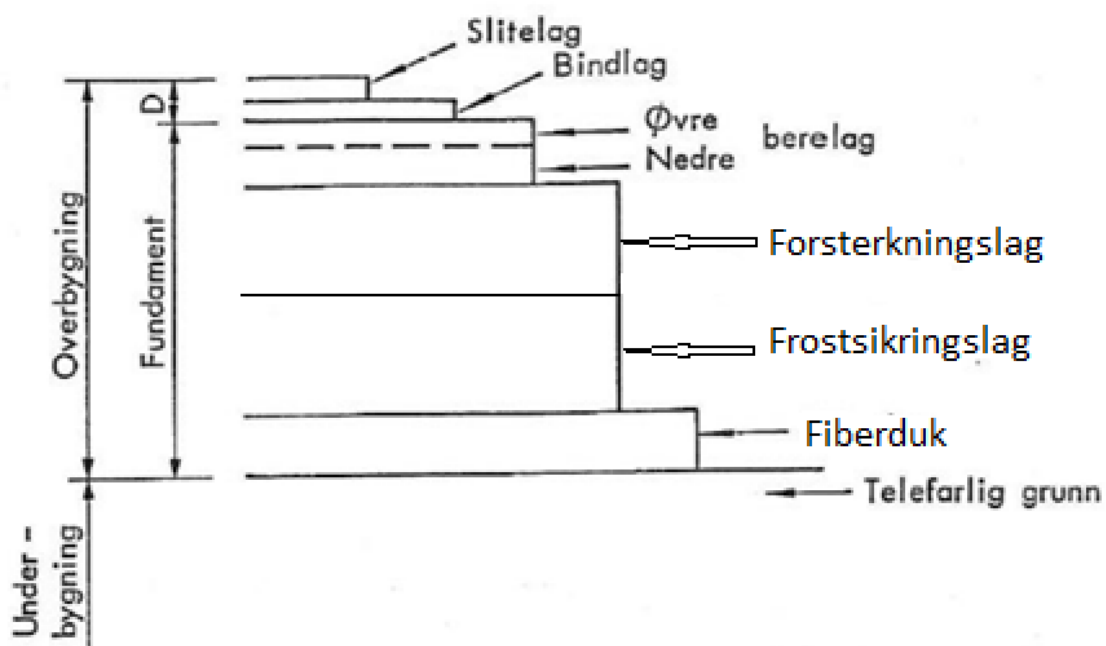
Dette kapitlet vil presentere litteraturstudien som er gjennomført i masteroppgaven og hovedfokuset vil være rundt fire områder. Det fire områdene er veikonstruksjon, bitumen, gjenbruk av asfalt og rejuvenatorer.

2.1 Veikonstruksjon

I dette delkapitlet vil det bli gitt en kort gjennomgang av de ulike komponentene i en veikonstruksjon. Deretter vil fokuset være rundt faktorer rundt dimensjonering av veidekket og noen viktige dekkeegenskaper.

2.1.1 Oppbygging av veikonstruksjonen

I Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018) er det oppgitt at «overbygning skal fordele laster fra trafikken til undergrunnen slik at det ikke oppstår skadelige eller uakseptable deformasjoner. Overbygningen skal bestå av veidekket, bærelag og forsterkningslag. Det kan også være behov for frostsikringlag ved telefarlig grunn, men kan utelates dersom tykkelsen av overbygningen er stor nok med hensyn til frost-nedtrengninger. Andre delkomponenter kan være fiberduk. Overbygning skal ha tilstrekkelig bæreevne hele året.». Et eksempel på hvordan en veioverbygning kan se ut er illustrert i figur 2.1.



Figur 2. 1: Overbygning med asfaltdekket på telefarlig grunn.

2.2 Grunnleggende faktorer ved dimensjonering av dekkekonstruksjoner

Det er mange faktorer som påvirker funksjonen av dekkekonstruksjonen. Derfor vil det bli gitt en kort omtale av de viktigste faktorene som er involvert i dimensjonering, utforming av en dekkekonstruksjon og som påvirker konstruksjonen gjennom helle brukstiden.

Trafikk er en primær faktor, fordi trafikkbelastningen påvirker bæreevnen i vegkonstruksjonen og kan både være statisk eller dynamisk (Nordahl and Mork, 2020). For eksempel vil høye hjul-laster og hvordan flere hjullaster er satt sammen i ulike akselkonfigurasjoner være viktig ved dimensjonering for bæreevne (Nordahl and Mork, 2020).

Videre er klima en viktig variabel for dimensjonering, fordi klimafaktorer som lufttemperatur, stråling, regn, snø, is og frost har alle betydelig innvirkning på tilstanden for vegkonstruksjonen og den evnen vegen har til å tåle trafikkbelastninger (Nordahl and Mork, 2020). I tillegg kan klima ha direkte påvirkning på vegkonstruksjonen ved avkjøling, oppvarming, frost, opptining og forvitring (Nordahl and Mork, 2020).

Grunnforhold er også viktig, fordi det er avgjørende for dimensjonering av overbygning og dekkekonstruksjonen (Nordahl and Mork, 2020).

I tillegg er vegbyggingsmateriale en viktig dimensjoneringsvariabel, fordi det er viktig å bruke materialer med god kvalitet og lokal tilgjengelighet for å bygge en økonomisk og funksjonsdyktig vegkonstruksjon (Nordahl and Mork, 2020).

2.1.2 Veidekket og dekkeegenskaper

Basert på Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018) skal dekket velges basert på gjennomsnittlig-års-døgn-trafikk (ÅDT) i åpningsåret. Fra figur 2.2 er det en myk og en stiv type dekket. Hvilken type dekket som skal velges i slitelaget er avhengig av bruksområde og dominerende påkjenninger (Statens vegvesen, 2014a). Myke dekker som mykASFALT (Ma) kan kun brukes på veger med $\text{ÅDT} \leq 1000$, mens stive dekker som ASFALTbetong (Ab) kan brukes på høye trafikkmengder for å ha god deformasjonsmotstand.

DEKKE (SLITELAG OG BINDLAG) AV BITUMINØSE MASSER (lagtykkelser i cm)				
Dekketype	ÅDT (i åpningsåret)			
	0 - 1000	1000 - 3000	3000 - 5000	> 5000
Myke dekketyper	4,0			
Stive dekketyper	3,0 over 3,0	3,5 over 3,0	4,0 over 3,0	4,0 over 4,0

Figur 2. 2: Minimum lagtykkelse er to ganger øvre siktstørrelse for steinmaterialet i massen (Statens vegvesen, 2014a).

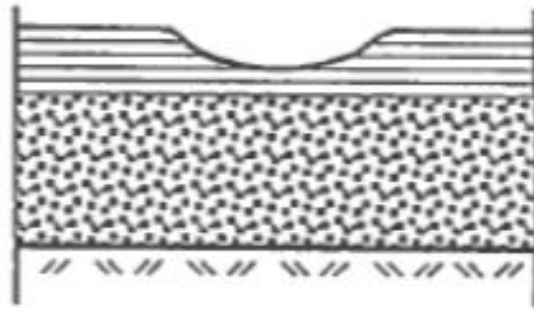
Det er mange dekkeegenskaper som er viktig, men jeg har avgrenset meg til å undersøke deformasjon og lavtemperatur-egenskapene. Dette er fordi disse er mest relevante i forhold til forsøkene som er gjennomført i denne masteroppgaven og er relevante skader som man har observert på gjenbruksveger (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016). Andre dekkeegenskaper som er viktig å nevne er for eksempel friksjon eller piggdekkslitasje.

Sporutvikling i asfaltdekket

Klassifisering av spordannelse gjøres oftest med bakgrunn i hvor skaden opptrer i konstruksjonen og hvilken årsak skaden har. En skiller vanligvis mellom tre hovedtyper spordannelse som er slitasjespor, spor på grunn av konsolidering (sammentrykking, etter kompaktering) og spor på grunn av plastiske deformasjoner (Bakløkk, 2013).

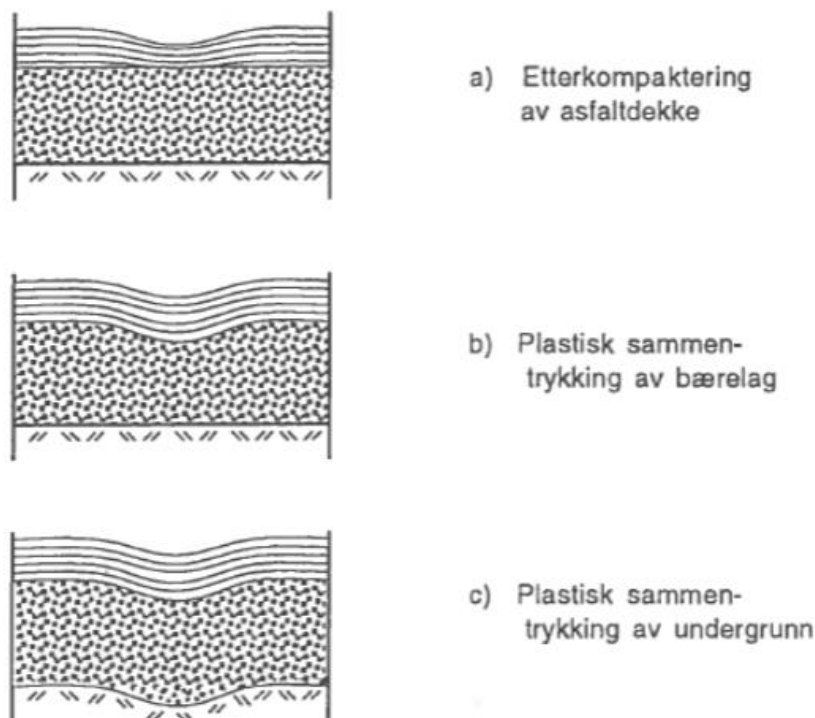
Det er viktig å nevne at spor på grunn av deformasjon i asfaltdekket utvikles gradvis med antall lastpasseringer på dekket, og fremtrer vanligvis som langsgående nedrykninger av dekket i hjulspor fulgt av små forhøyninger på siden (Bakløkk, 2013). Dette skyldes en kombinasjon av etter kompaktering (densitet økning) og plastisk deformasjon (skjærdeformasjon) og kan opptre såvel i dekke som i bærelag og fundament (Bakløkk, 2013).

Første spordannelse er slitasje, som skyldes at trafikken sliter på steinmaterialet og mørtelen i asfaltdekket. Denne slitasjen fører til at stein og mørtelen slites bort fra dekkeoverflaten (Bakløkk, 2013). Spor på grunn av slitasje er illustrert i figur 2.3.



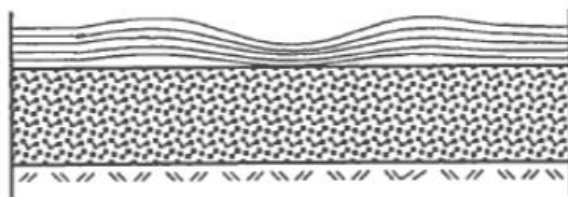
Figur 2. 3: Spor på grunn av slitasje (Bakløkk, 2013).

Den andre spordannelsen er konsolidering, som skyldes plastisk sammentrykking (etter kompaktering) som kan oppstå i flere nivåer i konstruksjonen illustrert i figur 2.4 (Bakløkk, 2013). Denne formen for plastisk deformasjon er vanligvis liten, fordi det skyldes volumreduksjon og reduksjon i hulrommet i det aktuelle materialet (Bakløkk, 2013).



Figur 2. 4: Forskjellige former for spordannelse på grunn av konsolidering (Bakløkk, 2013).

Den tredje spordannelsen er plastisk deformasjon som skyldes sideveis forskyvning av materialet i dekket på grunn av store skjærspenninger (Bakløkk, 2013). I motsetning til konsolidering er dette en deformasjon uten volumendring illustrert i figur 2.5 (Bakløkk, 2013).



Figur 2. 5: Spor på grunn av plastiske skjærdeformasjoner i dekket (Bakløkk, 2013).

Noen av faktorene som påvirker deformasjonsegenskapene i asfaltdekket er:

- Økning i temperatur kan føre til at deformasjonen øker med en faktor på 250-350 når temperaturen øker fra 20 til 60 grader celsius (Bakløkk, 2013).
- Trykkbelastning har betydning for hvor deformasjonen oppstår og er et vanlig problem ved bussfelt og der man har en stor andel tungtrafikk (Bakløkk, 2013).
- Stivheten og bindemiddelmengden påvirker deformasjonen og har størst betydning for deformasjon, fordi et mykt bitumen har lavere stivhet og gir dermed større deformasjon (Bakløkk, 2013).

I figur 2.6 er det gitt en oversikt over ulike faktorer som har innvirkning på deformasjonsegenskapene for en Asfaltbetong (Ab).

	FAKTOR	FORANDRING	PÅVIRKNING AV DEFORMASJONS- MOTSTAND
Steinmateriale	Ruhet	Glatt → ru	Økende
	Gradering	Ujevn → kontinuerlig	Økende
	Knusingsgrad	Lav → høy	Økende
	Størrelse	Økende maks. nominell størrelse	Økende
Bindemiddel	Stivhet	Økende	Økende
Massesammensetning	Bindemiddelinhold	Økende	Avtagende
	Hulrom	Økende	Avtagende
	Hulrom i steinskjelett	Økende	Avtagende 1)
	Kompakteringsmetode	2)	2)
Feltforhold	Temperatur	Økende	Avtagende
	Hjultrykk	Økende	Avtagende
	Trafikkmengde	Økende	Avtagende

1) Det kreves et visst minimumsinhold av hulrom i steinskjelettet

2) Valg av kompakteringsmetode/utstyr kan virke inn på deformasjonsmotstanden

Figur 2. 6: Oversikt over ulike faktorer innvirkning på deformasjonsmotstanden (Bakløkk, 2013).

Lavtemperatur oppsprekking

Selv om bitumen utgjør 5 % av asfalten er motstanden mot lavtemperatur- oppsprekking nesten helt avhengig av bindemiddelegenskapene (Hoff, 2014).

I prinsipp vil alle materialer utvides eller trekke seg sammen avhengig av temperaturen (Hoff, 2014). Dette kan beskrives med en enkel lineær formel $\epsilon = \alpha \Delta T$, hvor ΔT er endring i temperatur og α er en utvidelseskoeffisient som er i størrelsesorden $2-3 \cdot 10^{-6}$ / grader celsius for asfalt (Hoff, 2014). Det er viktig å nevne at α -verdien for asfalt er ikke konstant og vil være mindre ved lavere temperaturer (Hoff, 2014).

Når temperaturen faller raskt vil asfalten trekke seg sammen, men på grunn av friksjon mellom asfalten og bærelaget, fordi asfalt er sammenhengende slik at det vil bygges opp spenninger som kan utløse sprekker på tvers (Hoff, 2014). Dette kan være et problem i flere områder i Norge som i innlandet eller Finnmark hvor forskjellen mellom høyeste og laveste temperatur er stor gjennom året (Hoff, 2014).

En løsning kan være å bruke et mykere bindemiddel med høyere motstand mot lavtemperatur- oppsprekking, men dette kan gi deformasjonsproblemer fordi stivheten er redusert (Hoff, 2014).

2.3 Bitumen

I dette delkapitlet vil det bli gitt en kort beskrivelse av oppbygging av bitumen, produksjonsmetoden for bitumen, egenskaper ved bitumen, ulike bindemiddeltyper og et verktøy som heter «Bitumen Test Data Chart».

2.3.1 Oppbygging av bitumen

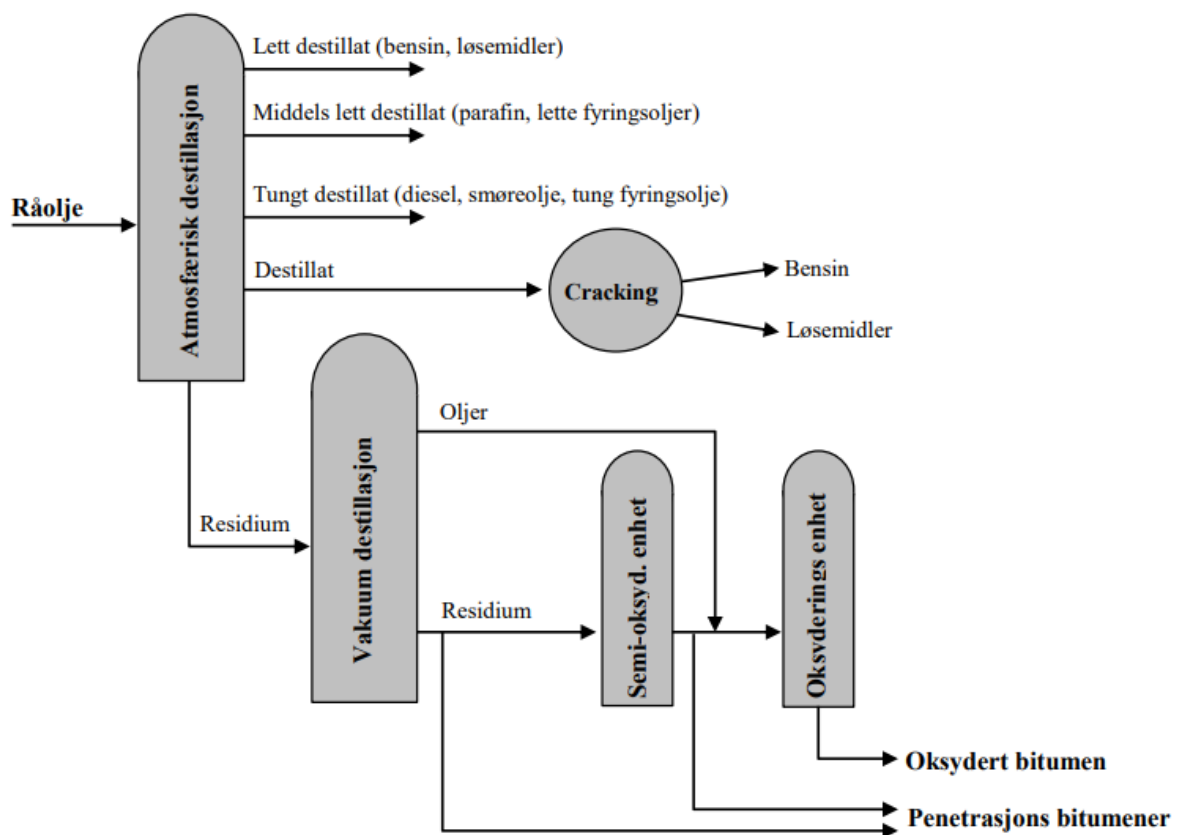
Bitumen er forenklet sagt de tyngste komponentene i råoljen. Det består i hovedsak av store tunge hydrokarbonmolekyler (90-95 %), de resterende 5-10 % består av nitrogen, oksygen, svovel samt sporstoffer av ulike metaller (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

2.3.2 Naturlig og raffinert bitumen

Bitumen kan forekomme naturlig i jordbek. Dette har skjedd ved at de lette materialene i råoljen har fordampet, mens det som ble værende igjen er et tykt, svart, klebende stoff som vi kaller naturbitumen (Nordahl, Andersen and Mork,

2018). Det er ikke store forekomster av naturlig bitumen i verden, I hovedsak er alle bitumen som benyttes i dag framstilt ved raffinering (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Selve prosessen for framstilling av bitumen er godt beskrevet i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «raffinering av bitumen skjer i hovedsak etter to hovedprosesser, atmosfærisk destillasjon og vakuumdestillasjon, se figur 2.7. Destillasjonsprosessen kan være en satsprosess eller en kontinuerlig prosess. I en rørovn blir råoljen oppvarmet til 300-350 grader celsius.



Figur 2. 7: Fremstilling av bitumen ved destillasjon av råolje (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Aller nederst i destillasjonstårnet blir de tyngste komponentene i råoljen, det såkalte residiet, med kokepunkt over 300-350 °C liggende igjen i figur 2.7. Ved raffinering av bestemte typer råoljer kan dette materialet tappes ut og brukes direkte som bitumen til asfaltdekke. Slike bindemidler kalles gjerne «straight run» bitumener. Svært ofte er det behov for en ytterligere destillasjon for å få ut enda mer av de lette destillatene. Denne destillasjonen utføres ved lavt trykk og kalles vakuumdestillasjon i figur 2.7.

Selv etter vakuumdestillasjon kan residiet være for mykt til å kunne brukes som bindemidler. I slike tilfeller blåses oksygen gjennom residiet for å gjøre det stivere i et eget oksyderingsanlegg. Slike bindemidler kalles oksyderte eller blåste bindemidler i figur 2.7.

Avhengig av hvor i prosessen produktene tappes av, kan man altså produsere bindemidler med stor variasjon i stivhet. I praksis produserer man et begrenset antall stive og myke produkter, og blander så disse for å lage mellomliggende produkter. Bindemidler som er tillagt ved blanding av et stivt produkt og mykere «fluks» kalles gjerne fluksede bindemidler».

2.3.3 Egenskaper til bitumen

Bitumen er et komplekst materiale både fysisk og kjemisk, fordi materialet består av et antall ulike molekyler og samspillet mellom dem forandrer seg avhengig av temperatur og tid (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Tre viktige egenskaper til bindemiddelet er vedheft, konsistens og bestandighet (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Vedheft

Et av egenskapene til bitumen er evnen til å fungere som et limestoff i asfalten (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Konsistens

Bitumen er et såkalt termoplastisk materiale, dvs konsistensen er avhengig av temperaturen (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). For eksempel vil konsistensen forandre seg fra et stivt, sprøtt, glassaktig elastisk materiale ved lave temperaturer, via et viskoelastisk materiale ved mellomliggende temperatur til et viskøst materiale ved høye temperaturer (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). To konsistentmål som brukes er viskositet og penetrasjon (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). For eksempel er det viktig at bindemidlet ikke er for tyntflytende og renner av steinmaterialet etter blanding eller for stivt som kan gi dårligere motstand mot lavtemperatur-oppsprekking (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Bestandighet

Den tredje egenskapen til bitumen er evnen som limstoff og bindemidlets konsistens som må kunne holdes over tid, dvs bindemidlets funksjonelle egenskaper må altså ha en viss bestandighet (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). For eksempel vil eksponering av luft, vann, lys, temperaturvariasjoner og spenninger under trafikkbelastninger kunne endre bindemidlet over tid (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) vil det «under varmeblending av asfaltmasse skje en betydelig herding av bindemidlet. Temperaturen er høy og der er rikelig med tilgang på oksygen. Bindemidlene oksyderes, og det blir betraktelig stivere. Samtidig skjer det også en viss fordamping av flyktige bestanddeler i bindemidlet, som også gjør at det blir stivere.

Herdingsprosessen fortsetter også ute i det fri etter at asfaltdekket er lagt ut, men nå i et langt roligere tempo. Under eksponering for luft, lys, fuktighet og temperaturvariasjoner blir bindemidlet langsomt stivere pga oksidasjon, fotokjemisk reaksjoner og at molekylene delvis vokser sammen og danner mer komplekse strukturer.

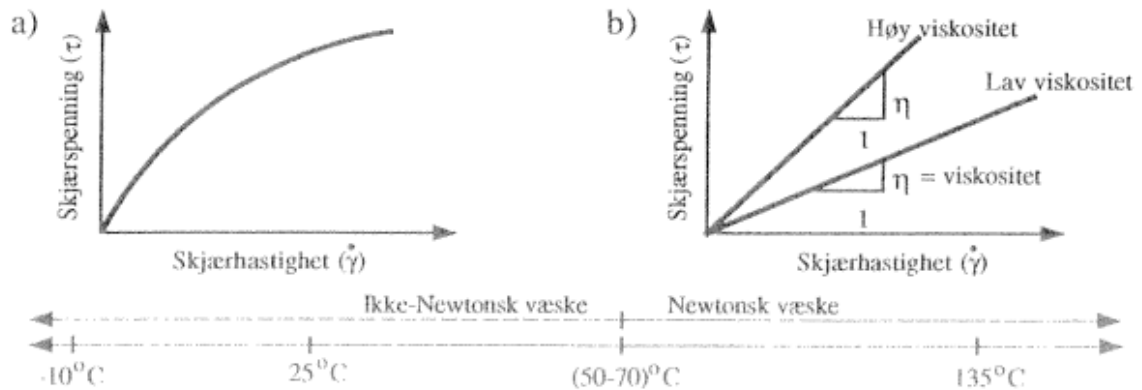
Disse endringene over tid kan føre til at vedheften i asfaltmassen gradvis forringes og bindemidlet mister sine fleksible egenskaper og blir stivt og sprøtt. Denne prosessen kaller vi aldring. Aldrings prosessene går fortest i åpne dekker med høyt hulrom. Ulike bindemidler kan også ha svært ulike aldringsegenskaper».

2.3.3.4 Modell for fysiske egenskaper ved bitumen

Bitumen er et materiale som er vanskelig å gjenskape, fordi det er et komplisert materialet og det er vanskelig å konstruere samspillet mellom de ulike molekylene (Andersen, 1995). Derfor brukes såkalte makrostrukturelle modeller for å beskrive de fysiske egenskapene til bitumen (Andersen, 1995). Et eksempel som vil bli nærmere beskrevet er hentet fra det amerikanske forskningsprosjektet Strategic Highway Research Program (SHRP) for å beskrive de fysiske egenskapene til bitumen (Andersen, 1995).

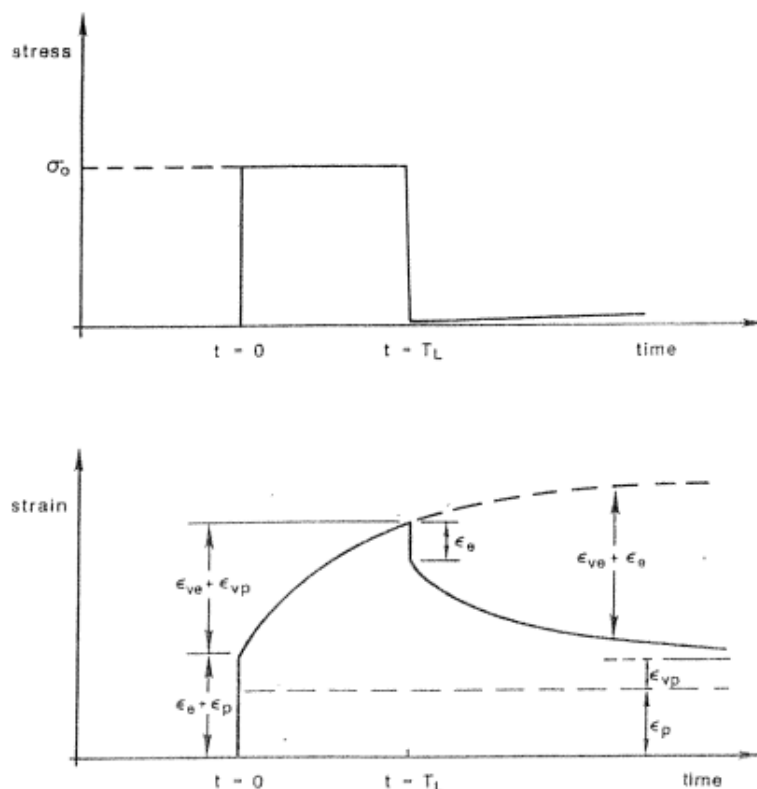
De reologiske (reologi-læren om flyte og deformasjonsegenskaper) egenskapene til bitumen vil forandre seg med både temperatur og belastningstid (Andersen, 1995).

Fra figur 2.8 vil en umodifisert bitumen ved temperaturer over 50-70 grader celsius oppføre seg som en Newtonsk væsker, dvs viskositeten (forholdet mellom skjærspenning og skjærhastighet) er konstant ved økende temperatur (Andersen, 1995).



Figur 2. 8: Bitumens viskøse egenskaper (Andersen, 1995).

For temperaturer under 50-70 grader celsius vil bitumen endre karakter, fordi sammenhengen mellom skjærspenning og skjærhastighet ikke lenger er lineære (Andersen, 1995). Da vil viskositeten være avhengig av skjærspenning og skjærhastighet og vil ha mer en elastisk karakter ved lavere temperaturer (Andersen, 1995). I dette såkalte «ikke Newtonske» område har bitumen det som kalles viskoelastisk materialoppførsel (Andersen, 1995). Figur 2.9 viser materialresponsen til et tenkt viskoelastisk materiale under et krepforsøk.



Figur 2. 9: Komponenter av responsen til et viskoelastisk materiale i et krepforsøk (Andersen, 1995).

Beskrivelsen i figur 2.9 er godt beskrevet i rapporten «**Ny Asfaltteknologi**» (Andersen, 1995) og sier at «i det øyeblikket lasten påføres oppstår det en momentan deformasjon bestående av en elastisk gjenvinnbar komponent ϵ_e og en plastisk ikke gjenvinnbar komponent ϵ_p . Etter hvert som tiden går, vil deformasjonen øke inntil lasten fjernes ved tiden T_1 . Denne tidsavhengige deformasjonen består av en viskoelastisk komponent ϵ_{ve} som er 100% gjenvinnbar og en viskoplastisk komponent ϵ_{vp} som ikke er gjenvinnbar. Når lasten fjernes, vil man få tilbake den momentane elastiske komponenten ϵ_e og med tid helt og holdent også viskoelastiske komponenten ϵ_{ve} . Man sitter til slutt igjen med en permanent deformasjon bestående av den momentane plastiske (ϵ_p) og den tidsavhengige viskoplastisk (ϵ_{vp}) deformasjonen. Dermed vil bitumen oppføre seg ved svært lave temperaturer eller høye belastningsfrekvenser som et elastisk materiale og materialresponsen kan beskrives ved hjelp av Hooke's lov».

2.3.4 Bindemiddeltypene

Det er behov for ulike typer bituminøse bindemidler for framstilling av asfalterte materiale til bærelag og dekke. For eksempel stilles det ulike krav til konsistens og stivhet i bindemidlet avhengig av aktuell trafikk og klima forhold (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Det er mange ulike bindemiddeltypene, men jeg har avgrenset meg til å forklare noen av dem som er bitumen og skumbitumen (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Dette er fordi disse bindemiddeltypene blir forklart i ulike sammenhenger videre i teksten og må derfor forklares litt på forhånd. Andre bindemiddeltypene kan være myk-bitumen, bitumenemulsjon, bitumenløsning og vegolje eller polymermodifiserte bindemidler (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Bitumen

Basert på rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) er «bitumen det viktigste asfaltbindemidlet man har og leveres i mange ulike stivhetsgrader (grad-benevninger fra 35/50 til 330/430). Bitumen brukes blant annet til varmblandede asfaltmasser, overflatebehandlinger, penetrering av pukk-bærelag og til fremstilling av bitumenemulsjon og skumbitumen.».

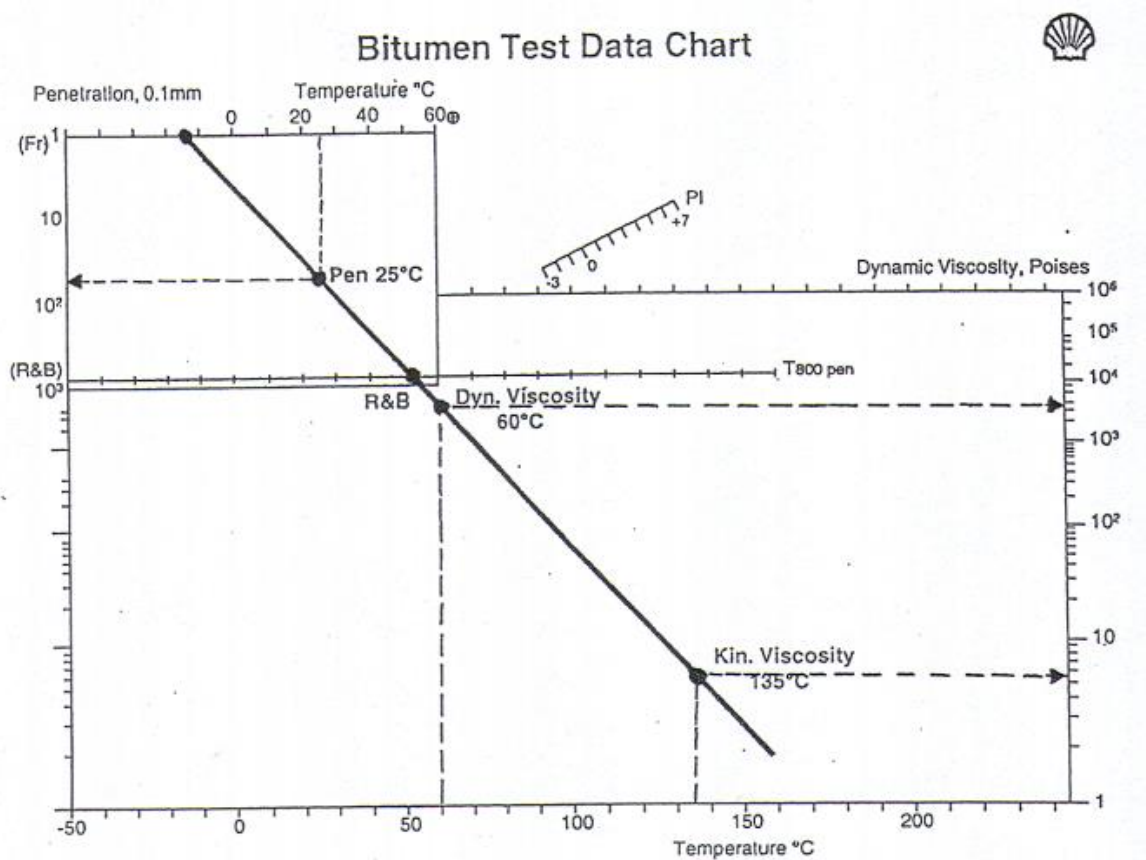
Skumbitumen

Basert på rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) er «skum-bitumen fremstilt av varm bitumen/myk bitumen ved å tilsette små mengder vann (1-4%) i en skummingsprosess. Denne prosessen fører til en kortvarig økning av bindemiddelvolum med 15-20 ganger. Denne teknikken er spesielt gunstig ved utføring av visse stabiliseringsarbeidet med bruk av lite bindemiddel. Skummingen hjelper til med å fordele bindemidlet jevnt i massen.».

Bitumen Test Data Chart

Bindemiddelets temperaturavhengighet kan beskrives ved hjelp av et «Bitumen Test Data Chart» (BTDC) og ligger til grunn for svært mange bindemiddelspesifikasjoner rundt om i verden (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Diagrammet er utformet slik at verdier for Fraass bruddpunkt, penetrasjon, mykningspunkt og viskositet plottes inn og danner en rett linje (for normale bitumener) som sier noe om bindemidlets temperaturfølsomhet i figur 2.10 (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Helningen på

linjen i BTDC sier oss noe om bindemiddelkvaliteten. For eksempel vil en slak linje gi et lite temperaturfølsom bitumen (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).



Figur 2. 10: Shell bitumen Test Data Chart (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

2.4 Gjenbruksasfalt

I dette delkapitlet vil det bli gitt en definisjon av begrepet gjenbruksasfalt. I tillegg vil det bli gitt en oversikt over ulike bruksområder for gjenbruksasfalt. Samtidig vil det bli presentert en produksjonsmetode for gjenbruk av asfalt med sine fordeler og ulemper.

2.4.1 Definisjon av begrepet gjenbruksasfalt (Gja)

Gjenbruksasfalt er definert av Kontrollordning For Asfaltgjenvinning (KFA, 2019c) som «betegnelse på bærelag eller dekke der bruken av gamle asfaltmasser skjer på en slik måte eller i et slikt omfang (80-100 % asfaltgranulat) at det ikke lenger er relevant å nytte spesifikasjonene for de andre normerte massetypene. Betegnelsen

gjenbruksasfalt forutsetter at nytt bindemiddel tilsettes i den gamle asfaltmassen. Den bearbejdede massen kan være kald eller varm».

2.4.2 Bruksområde for gjenbruk av asfalt

Det skilles ofte mellom tre bruksområder ved gjenbruk av asfaltgranulat som gjenbruk i ordinære asfalttyper, gjenbruksasfalt og ubunden bruk (KFA, 2019c).

Gjenbruk i ordinære asfalttyper

Normerte massetyper er massetyper som Asfaltbetong (Ab), Asfaltgrusbetong (Agb) eller Asfaltert grus (Ag) med krav i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) og «**Retningslinjer asfalt 2019**» (Statens vegvesen, 2018). Når disse massetypene produseres med gjenbruk gjelder de samme kravene til ferdig masse som om det ikke var tilsetning av asfaltgranulat (KFA, 2019c). I Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) settes det begrensning for andelen gjenbruk som kan anvendes i normert massetype avhengig av massetype og produksjonsteknikk i figur 2.11. For eksempel er det satt krav til dokumentasjon ved tilsetning av større mengder asfaltgranulat enn 10 % i slitelagsmasser og 20 % i bærelagsmasser (Statens vegvesen, 2018). Samtidig er det andre begrensninger tilknyttet bruk av ubundne materialer, blant annet i forhold til lagtykkelse og antall lag i overbygning (KFA, 2019c).

Tilsatt bindemiddel	Lag	Massetype	Trafikkmengde, ÅDT	Tilsetning av resirkulert asfalt, maks	
				Kald tilsetning	Forvarmet tilsetning
Polymermodifisert bitumen	Alle	Alle ¹⁾	Alle	10 %	10 %
Vegbitumen	Slitelag	Ska ¹⁾	Alle	10 %	10 %
		Ab	≥ 5000	15 %	25 %
			< 5000	15 %	40 %
		Agb	< 3000	15 %	40 %
	Bindlag, avrettingslag	Alle	Alle	25 %	40 %
Bærelag	Ag	Alle	Alle	25 %	40 %

1) Forutsatt dokumentasjon av resirkulert asfalt med hensyn på bindemiddelinhold, steinmaterialets kornfordeling og kulempølleverdi.

Figur 2. 11: Begrensning av tilsetning av resirkulert asfalt i andel vekt-% av total masse (KFA, 2019c).

Ubunden bruk (Ak)

Ved ubunden bruk blir asfaltgranulat direkte brukt i bruksområde hvor man ellers ville brukt nyproduserte materialer uten tilsetning av bindemiddel eller oppvarming (KFA,

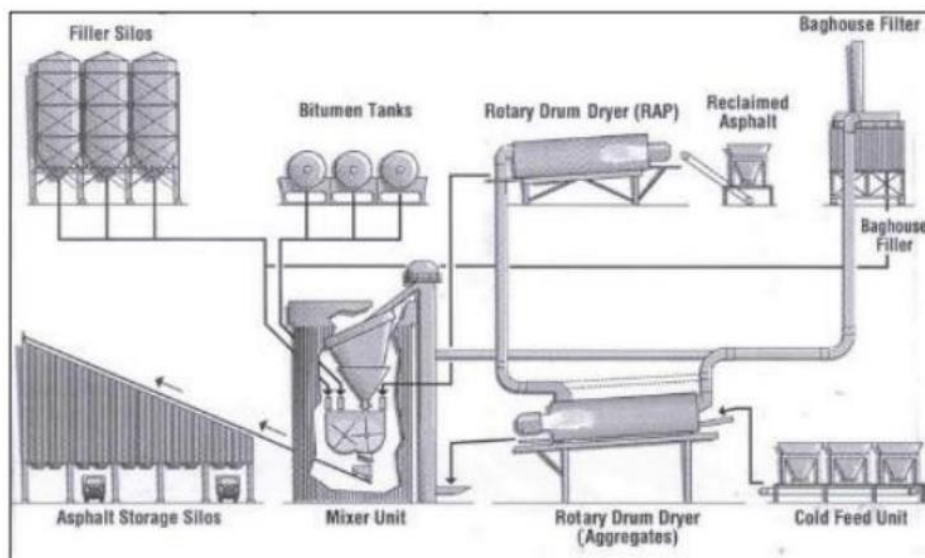
2019c). Typiske bruksområder kan være i forsterkningslaget, bærelaget, forkilingsmasse av pukklag, midlertidige anleggsveier, som et alternativ til grusdekke eller opprustning av veiskulder (KFA, 2019c).

2.4.3 Produksjonsmetode for gjenbruksasfalt (Gja)

Som tidligere nevnt kan gjenbruksasfalt bli produsert enten i varm eller kald blandeverk eller direkte tilsetning av gjenbruksasfalt i vegen enten varm eller kald. Dette delkapitlet vil bare beskrive varm gjenbruksasfalt produsert i blandeverk og nevne fordelene/ulempene med produksjonsmetoden. Dette er fordi denne metoden er mest relevant i forhold til masteroppgaven.

Varm gjenbruksasfalt produsert i blandeverk

Ved varm resirkulering kreves det at gjenbruksasfalten blir foroppvarmet (Hoff, 2020). Litt avhengig av asfaltverk kan det være en parallell trommel som varmer opp gjenbruksasfalten i figur 2.12. Deretter blir gjenbruksmaterialet flyttet til en mikseenhet hvor bitumen tilsettes (Hoff, 2020).



Figur 2. 12: Eksempel av prosessen involvert i resirkulering av varm gjenbruksasfalt i sentral verk (Hoff, 2020).

En av fordelene med å bruke varm produksjon av asfalt er resirkuleringsprosenten som kan være mellom 80 til 100 % (Hoff, 2020) i figur 2.12. Et alternativ kan også være å bruke lavtemperaturasfalt hvor asfalten produseres med redusert temperatur, 100-140 grader celsius, ved hjelp av skumming eller tilsetningsstoffer (KFA, 2019c). Denne metoden reduserer belastningen på miljøet, fordi produksjonstemperaturen

kan reduseres (KFA, 2019c). I tillegg kan arbeidsmiljøet forbedres ved at mengden bitumenrøyk reduseres (KFA, 2019c). Lavtemperaturasfalt er ikke en egen type asfalt men at produksjonstemperaturen reduseres, mens blandetiden økes for å få en god homogen blanding (KFA, 2019c). Videre blir kontraktøren betalt for å ta imot gjenbruksasfalt (Hoff, 2020) .

Noen av ulempene med å bruke varm produksjon av gjenbruksasfalt i verk er kostnaden for selve asfaltverket med egen tørketrommel og oppvarmingskostnaden (Hoff, 2020). Samtidig vil oppvarming kunne frigjøre CO₂ og dermed påvirke miljøet negativt. I tillegg kommer kostnaden med å teste sluttmateriallet, fordi det kan være vanskelig å finne balansen mellom høye gjenbruksandeler og asfalterte egenskaper, optimale bindemiddelinnhold eller stivhet (Hoff, 2020).

2.5 Rejuvenatorer

I dette delkapitlet vil det bli gitt en definisjon på begrepet rejuvenators og hvorfor det brukes i aldret bitumen. I tillegg vil det bli beskrevet en metode for å bestemme rejuvenator-mengden for å oppfylle noen bindemiddelkrav. Samtidig vil det bli gitt en framgangsmåte for å evaluere ulike rejuvenatorer.

2.5.1 Definisjon av begrepet rejuvenator

Begrepet rejuvenator har ingen offisiell definisjon, fordi det er mange ulike produkter som kommer ut i markedet og blir kalt «rejuvenator» (EAPA, 2018). Basert på European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2018) kan rejuvenatorer bli definert som «midler for å gjenopprette de reologiske egenskapene i aldret bitumen fra gjenbruksasfaltene». Rejuvenatorene kan ikke gjenopprette de kjemiske sammensetningene i det originale bindemidlet. Dette skyldes effekten av oksidasjon i spesifikke deler av bitumen som ikke kan bli reversert ved å bruke industrielle produkter (EAPA, 2018). På den andre siden er rejuvenatorene ment for å gjenopprette de reologiske egenskapene for å oppfylle bindemiddel og asfalt mikskravene ved bruk (EAPA, 2018).

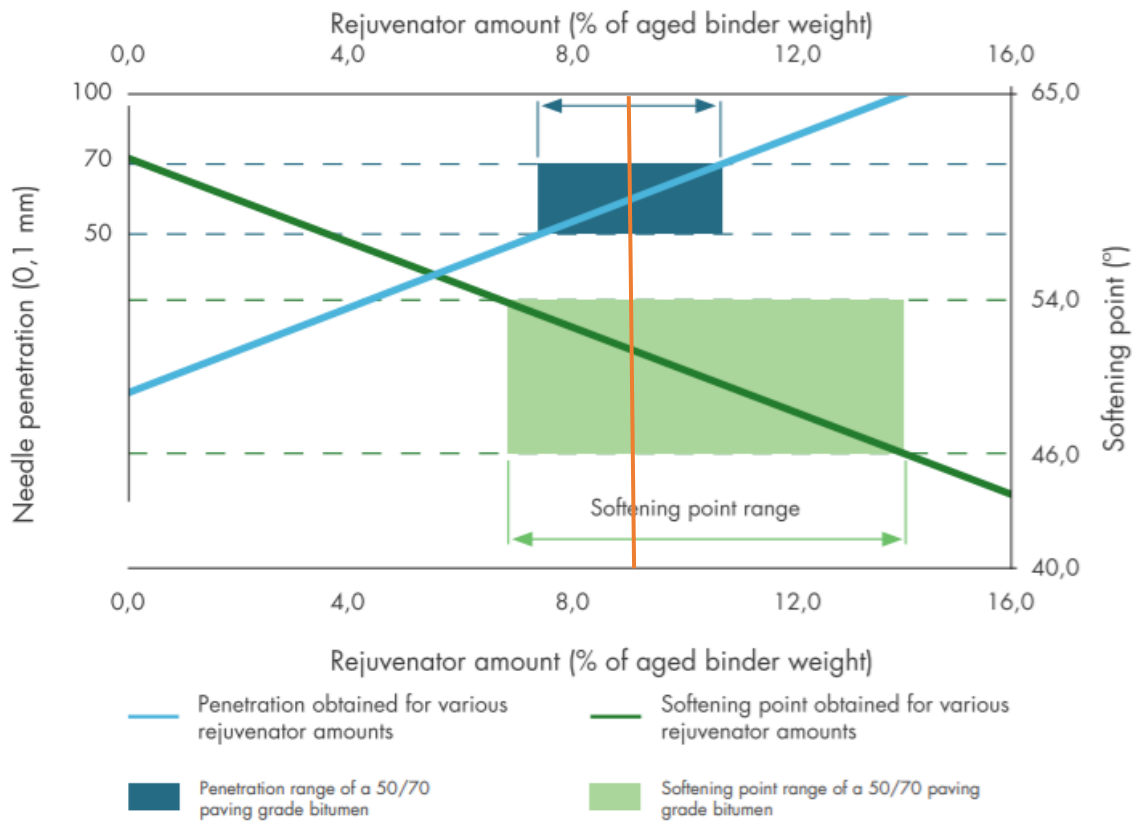
2.5.2 Effekten av rejuvenatorer i aldret bitumen

Bindemiddelet i gjenbruksasfalten blir hardere gjennom aldring og brukslevetiden på veien. For å kunne oppfylle de nye bindemiddelkravene ved bruk av høye andeler gjenbruksasfalt (25 % eller mer) er det behov for å bruke enten mykere bindemiddel, myknings-midler eller rejuvenator (EAPA, 2018). Ved å bruke et mykere bindemiddel eller rejuvenator vil stivheten i aldret bitumen reduseres og dermed forbedre opptreden av bindemiddelet under ulike forhold. Valget mellom å bruke et mykere bindemiddel eller rejuvenators er avhengig av kvaliteten og stivheten i bindemiddelet, mengden aldret bindemiddel eller type produksjon av asfaltmassen (EAPA, 2018).

Basert på tidligere studier om effekten av rejuvenator i aldret bitumen er det en generell trend at rejuvenatoren reduserer stivheten i aldret bitumen og forbedrer motstand mot lavtemperatur-oppsprekking sammenlignet med et 100 % aldret bitumen (Zaumanis *et al.*, 2014; Elkashef and Williams, 2017; Porot and Bell, 2019; Yousef and Aslam, 2019).

2.5.3 Gunstig rejuvenator-mengde i aldret bitumen basert på bindemiddeltester

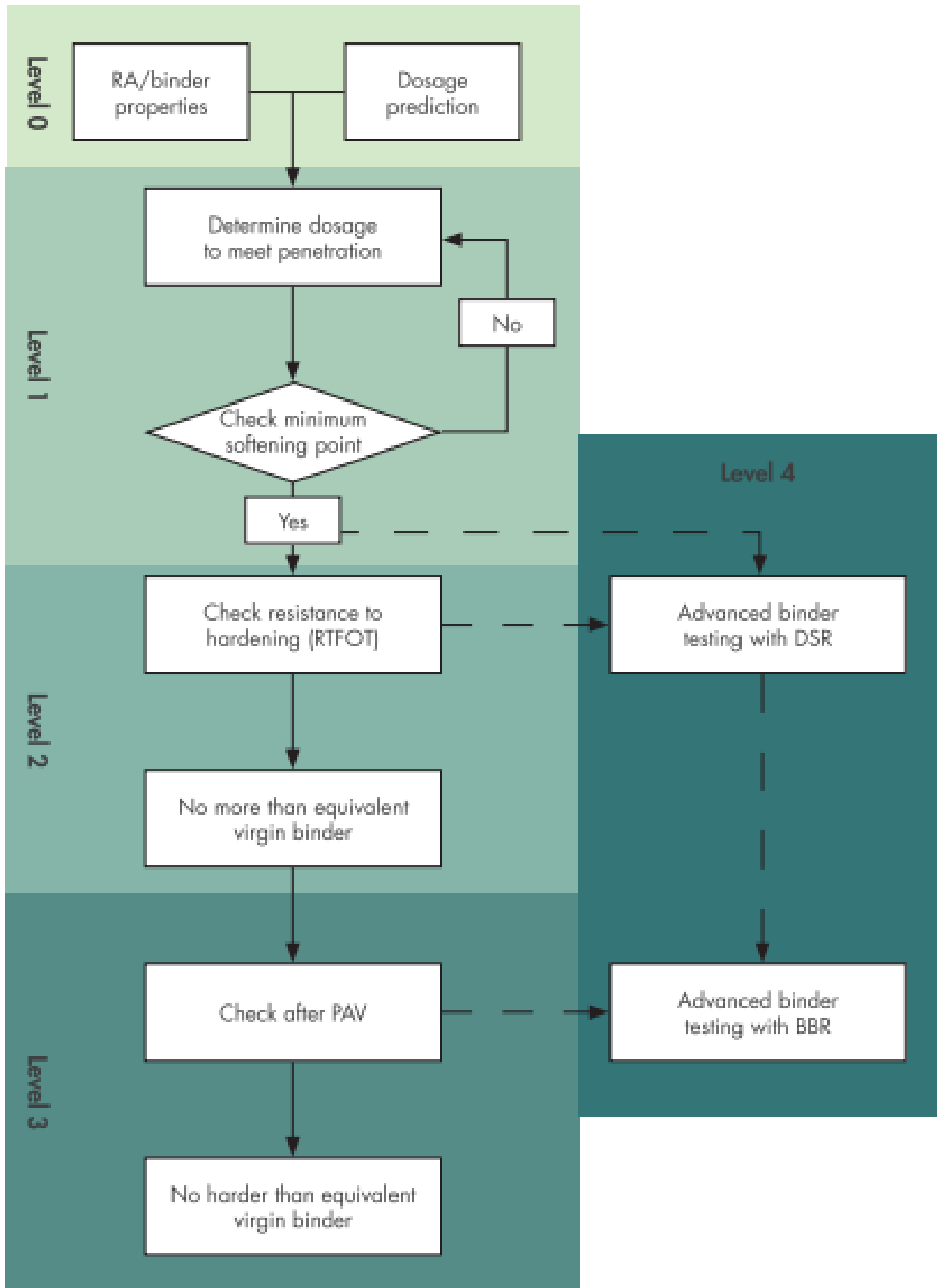
En metode å finne gunstig rejuvenator-mengde på er basert på penetrasjonsverdi og mykningspunkt-temperatur (EAPA, 2018). Denne metoden er anbefalt i European Asphalt Pavement Association og baserer seg på å gjennomføre 2 penetrasjon og 2 mykningspunkt-tester med 2 forskjellige mengder rejuvenator tilsatt i aldret bitumen. Deretter plottes penetrasjon, mykningspunkt og kravene for mykningspunkt/penetrasjonsverdi for ønsket bindemiddel i et diagram (EAPA, 2018) illustrert i figur 2.13. På figur 2.13 er mykningspunkt-temperaturen for 0 og 16 % rejuvenator-mengder oppgitt i %-vekt av aldret bitumen i form av en grønn linje med tilsvarende kravområdet for ønsket mykningspunkt. Tilsvarende er det tegnet inn en blå linje i figur 2.13 med penetrasjon og kravområdet for ønsket penetrasjonsverdi. Deretter kan en gunstig rejuvenator-mengde som både oppfyller penetrasjon og mykningspunkt-kravet for ønsket bindemiddel tegnes med en vertikal linje (orange) som går igjennom kravområdene i Figur 2.13.



Figur 2. 13: Eksempel av blandediagram for en gitt rejuvenator og aldret bitumen (EAPA, 2018).

2.5.4 Valg av rejuvenator i aldret bitumen

For å kunne velge mellom ulike rejuvenatorer vil det ikke være nok å gjennomføre de empiriske bindemiddeltestene, fordi bindemiddlets reologiske egenskaper vil endre seg med aldring (EAPA, 2018). En prosedyre er gitt av European Asphalt Pavement Association for å evaluere ulike rejuvenators i figur 2.14. I nivå 0 og 1 handler det om å finne en gunstig rejuvenator-mengde for å oppfylle penetrasjon og mykningspunkt-kravet. Deretter kan bindemiddlet med rejuvenatoren bli kortidsaldret og testes for deformasjonsmotstand og stivhet i nivå 2 og 4. Til slutt kan bindemiddlet med rejuvenatoren bli langtidsaldret og testes for lavtemperatur-oppsprekking i nivå 3 og 4. De rejuvenatorene som oppfyller alle nivåene i figur 2.14 vil være aktuelle å bruke. I tillegg må andre bindemiddelkrav og bindemiddeltester også oppfylles før det kan anvendes på et sted.



Figur 2. 14: Eksempel på flytdiagram for mulig prosedyre for å evaluere rejuvenatorer (EAPA, 2018).

Kapittel 3: Teori og metode for laboratoriearbeidet

Dette kapitlet presenterer teori, standarder og metodene for testene som ble utført i det eksperimentelle arbeidet. Samtidig blir det gitt en beskrivelse av utstyret som ble brukt i denne masteroppgaven, feilkilder og avvik ved gjennomføring av testene.

3.1 Bituminøse bindemidler

Fra Staten vegvesen sin håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) er det oppgitt at «kravene til delmaterialer i asfalt omfatter «Bituminøse bindemidler», steinmaterialet, vedheftningsmidler og fibertilsetninger. Kravene til «Bituminøse bindemidler» er generelle og gjelder ved all anvendelse i vegbygging, kravene til steinmaterialet, vedheftningsmidler og fibertilsetning omfatter bare anvendelse i asfaltmasser».

I figur 3.1 er det gitt krav for penetrasjonsgradert vegbitumen. Kravene som er mest relevant er basert på NS-EN 12591: Bitumen og «Bituminøse bindemidler»-spesifikasjoner for vegbitumen» (Statens vegvesen, 2018). Kravene for de ulike testene skal være oppfylt ved anvendelsestidspunktet

	Enhet	Prøvs- metode NS-EN	Gradering						
			35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330	330/430
Penetrasjon ved 25 °C	0,1 mm	1426	35-50	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330	
Penetrasjon ved 15 °C	0,1 mm	1426							90-170
Mykningspunkt	°C	1427	50-58	46-54	43-51	39-47	35-43		
Løselighet	%	12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Dynamisk viskositet ved 60 °C ¹⁾	Pa s	12596	≥ 225	≥ 145	≥ 90	≥ 55	≥ 30	≥ 18	≥ 12
Viskositet ved 135 °C ¹⁾	mm ² /s	12595	≥ 370	≥ 295	≥ 230	≥ 175	≥ 135	≥ 100	≥ 85
	mPa·s	13302/ 13702	≥ 340	≥ 270	≥ 210	≥ 160	≥ 125	≥ 90	≥ 80
Fraass bruddpunkt	°C	12593	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15	≤ -16	≤ -18
Flammepunkt	°C	ISO 2592	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220		
		ISO 2719						≥ 180	≥ 180
Motstand mot oppherd- ing, RTFOT ved 163 °C		12607-1	Krav til gjenværende egenskaper etter korttidsaldring						
Masseendring, +/-	%	12607-1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Gjenværende penetrasjon	%	12607-1 + 1426	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37	≥ 35	
Viskositetsforhold (etter/før) ved 60 °C ¹⁾		12607-1 + 12596						≤ 4,0	≤ 4,0
Økning i mykningspunkt	°C	12607-1 + 1427	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11		

¹⁾ NS-EN 12596 og NS-EN 12595 er referansemetoder for viskositet ved henholdsvis 60°C og 135°C. Alternativt kan NS-EN 13302 eller NS-EN 13702 benyttes dersom tilfredsstillende korrelasjon er dokumentert.

Figur 3. 1: Krav til penetrasjonsgradert veibitumen (Statens vegvesen, 2018).

Fra figur 3.1 er det penetrasjon-testen ved 25 grader celsius, mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og motstand mot oppherding (Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT))

som ble nærmere undersøkt. Penetrasjon og mykningspunkt ble utført for å kontrollere om rejuvenatorene tilsatt i aldret bitumen oppfylte penetrasjonsgrad og mykningspunkt-kravet for et 70/100 bitumen. I tillegg ble lavtemperatur-egenskapene undersøkt gjennom Fraass bruddpunkt testen (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Videre ble rejuvenator-prøvene kortidsaldret (Rolling Thin Film Oven Test-RTFOT) for å bedre forstå hvordan bindemiddelegenskapene som mykningspunkt og fraass bruddpunkt endrer seg.

3.2 Analyse av bitumen basert på Strategic Highway Research Program («SHRP»)

Jeg har også brukt «**SHRP**»-bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) for å evaluere nedbrytningsmekanismen deformasjon for de ulike prøveblandinger. Dette er fordi de empiriske testene som penetrasjon og mykningspunkt ikke gjør oss i stand til å forstå og beskrive nedbrytningsmekanismen deformasjon for asfaltdekket på en god måte (Andersen, 1995). For eksempel er ikke spenninger og tøyninger som oppstår definert under de empiriske testene (Andersen, 1995). Dermed er det vanskelig å si, basert på disse testene, hvordan de reologiske egenskapene til bitumen forandrer seg med temperatur og belastningstid (Andersen, 1995). I «**SHRP**»-bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) i figur 3.2 er det gitt en øvre temperaturgrense etter forkortelsen PG, som står for Performance Grade. Temperaturen mellom PG klassene øker eller går ned med 6 grader celsius. Helt til venstre i figur 3.2 er de gitt faste krav som skal ivareta bindemidlenes funksjonsegenskaper. Disse kravene må være oppfylt ved ulike temperaturer avhengig av hvilken Performance Grade det aktuelle klimaet tilsier at man må velge (Andersen, 1995). Det er i hovedsak Dynamisk Skjær Reometer (DSR) som er mest relevant for min masteroppgave, fordi den er ment for å undersøke nedbrytningsmekanismen deformasjon. I figur 3.2 er det oppgitt krav om å gjennomføre kortidsaldring (Rolling Thin Film Oven) for prøvene som blir testet i DSR for å si noe om deformasjonen. Samtidig vil det bli gjennomført en langtidsaldring (Pressure Aging Vessel (PAV)) for alle prøvene som senere vil bli testet i DSR for å undersøke effekten på bindemiddelegenskapen utmatting. Bindemiddeltestene mykningspunkt og Fraass bruddpunkt vil også bli gjennomført for de ulike prøvene etter korttids og langtidsaldring.

PERFORMANCE GRADE	PG 70-						PG 76-						PG 82-					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	
Average 7-day Maximum Pavement Design Temp, °C*	<70						<76						<82					
Minimum Pavement Design Temperature, °C*	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	
ORIGINAL BINDER																		
Flash Point Temp, T48: Minimum °C	230																	
Viscosity, ASTM D4402? Maximum, 3 Pa·s, Test Temp, °C	135																	
Dynamic Shear, TP5: ^f G'/sinδ, Minimum, 1.00 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76						82					
ROLLING THIN FILM OVEN (T240)																		
Mass Loss, Maximum, percent	1.00																	
Dynamic Shear, TP5: ^f G'/sinδ, Minimum, 2.20 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76						82					
PRESSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP1)																		
PAV Aging Temperature, °C*	100(110)						100(110)						100(110)					
Dynamic Shear, TP5: ^f G'/sinδ, Maximum, 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	22	40	37	34	31	28	
Physical Hardening ^g	Report																	
Creep Stiffness, TP1: ^f S, Maximum, 300.0 MPa, m - value, Minimum, 0.300 Test Temp @ 60s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	
Direct Tension, TP3: ^f Failure Strain, Minimum, 1.0% Test Temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	

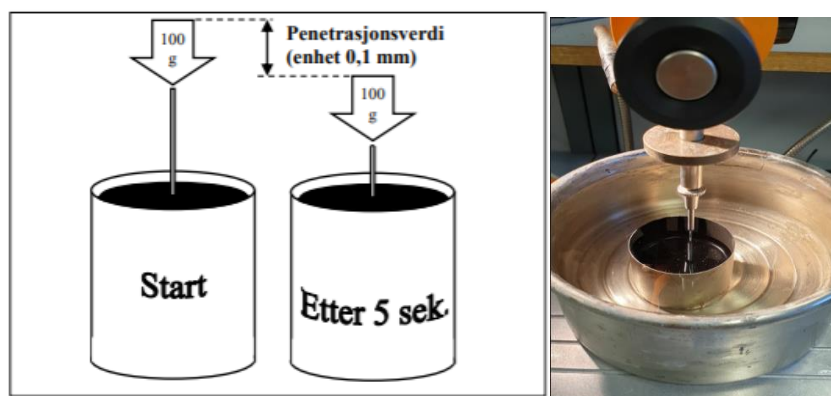
Figur 3. 2: Performance Graded Asphalt Binder Specifications (Andersen, 1995).

3.3 Penetrasjon

Den praktiske utførelsen av penetrasjonstesten er basert på Statens vegvesen sin håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 1426: 2015 «Bitumen og bitumnøse bindemidler. Bestemmelse av nålepenetrering».

Fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) er «penetrasjonstesten en gammel empirisk (erfaringsbasert) test som gir et mål på konsistensen til bitumen. Penetrasjonstesten ble utviklet på slutten av 1800 tallet og er fortsatt brukt for å klassifisere bitumen.».

Penetrasjonen ble utført som i illustrert i figur 3.3. Beskrivelsen av prøven er hentet fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og starter med at «bindemiddelprøven blir fylt i en metallkropp og varmet opp til 25 grader. En standardisert nål med konisk spiss blir senket ned til bindemiddeloverflaten og belastes med et lodd, totalt 100 gram i masse. Under denne lasten synker nåla gradvis ned i bindemiddelet. Etter fem sekunder stoppes nåla og vi måler hvor langt den har sunket ned i bindemiddelprøven. Denne nedsynkningen blir uttrykt med 0.1 mm som enhet som vi kaller penetrasjonsverdien.».



Figur 3. 3: Penetrasjonsforsøket (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og penetrasjonsapparatet på NTNU.

Selve inndelingen av bitumen er også godt beskrevet i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «bitumen for varmeblandet asfalt kan i henhold til bindemiddelspesifikasjon (se figur 3.1), ha penetrasjonsverdi fra 35 til 330 ved 25 grader. I de norske spesifikasjonene deles bindemidlene inn i hardhetsklasser uttrykt ved minimums og maksimumsverdi for nettopp penetrasjon. Hardhetsklassene angis med gradbenevning X/Y, der X er minste tillate og Y er største tillate penetrasjonsverdi i aktuell klasse. På hard-bitumen måles liten penetrasjons, mens på mykt-bitumen måles større penetrasjon.».

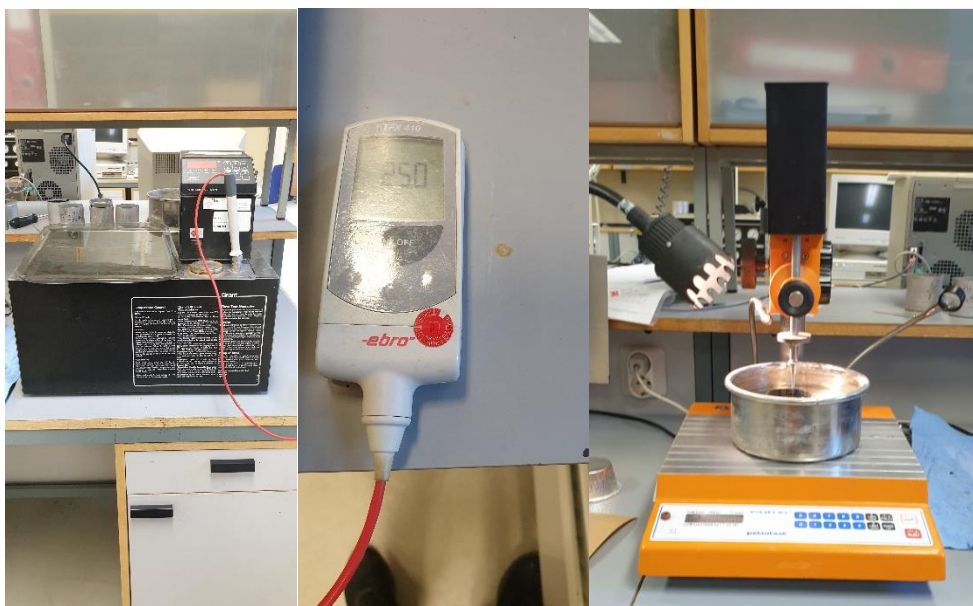
For hver test ble det tatt tre målinger og gjennomsnittet for disse målingene ble rundet opp til nærmeste helle tall. Fra Statens vegvesen håndbok «**R210 laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) kan den registrerte penetrasjonsverdien rapporteres hvis forskjellen mellom de tre enkelt-målingene ikke overstiger en spesifisert grense gitt i figur 3.4.

Penetrasjon, 0,1 mm	- 49	50 - 149	150 - 249	250 -
Maks. tillatt avvik mellom høyeste og laveste verdi	2	4	6	8

Figur 3. 4: Tillatt avvik mellom enkeltmålinger (Statens vegvesen, 2014b)

Foroppvarmingstemperaturen avviker fra Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b), fordi

blandingstemperatur skulle være på 130 grader celsius i blandeprosedyren «**American Society for Testing and Materials-(ASTM D 4887)**». I tillegg var det vanskelig å oppfylle kravet fra figur 3.4 for alle prøvene, fordi penetrasjonsresultatene i vedlegg 1 varrierte litt mer. Dette er i hovedsak på grunn av uerfaren bruk av apparatet og noen feilkilder. For eksempel var det vanskelig å få nålhode rett over bitumenoverflaten ved å følge med på nålskyggen. Denne feilkilden kan reduseres ved å utføre flere penetrasjonsforsøk og få mer erfaring med å bruke apparatet. I tillegg er det viktig at nåltuppen byttes ut etter hver enkeltmåling eller at bitumen fjernes fra nåltuppen. Utstyret som ble brukt er illustrert i figur 3.5.



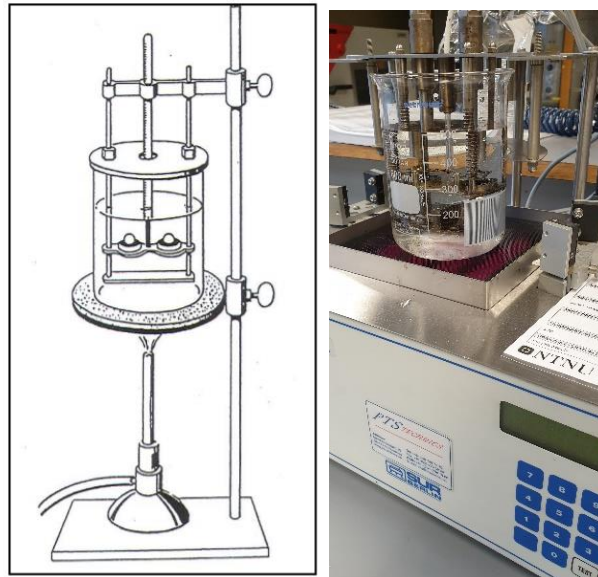
Figur 3. 5: Penetrasjonsforsøk med vannbad (venstre bilde), Termometer (midterste bilde) og penetrasjonslodd med nål (høyere bilde).

3.4 Mykningspunkt

Den praktiske utførelsen av mykningspunkt er basert på Statens vegvesen sin håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 1427: 2015 «Bitumen og bitumnøse bindemidler. Bestemmelse av mykningstemperatur. Ring-og kule-metode».

Hensikten ved å gjennomføre mykningspunkt-testen er å bestemme mykningspunktet for bitumen og «Bituminøse bindemidler» i temperaturområde 28 til 150 grader celsius (Statens vegvesen, 2014b) .

I figur 3.6 er det illustrert et bilde av mykningspunktapparatet som ble brukt. I mykningspunkt-testen eller «kule og ring»-testen blir prøven av bindemidlet støpt i to ringer og plassert på et stativ i et vannbad ved 5 grader celsius. Vannbadet brukes til bitumen med et mykningspunkt på 80 grader celsius eller lavere, mens glyserol brukes til mykningspunkt over 80 grader (Statens vegvesen, 2014b).



Figur 3. 6: Venstre bilde viser mykningspunktapparat (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og høyere bilde er mykningspunktapparat på NTNU.

Prosessen for mykningspunkt er godt beskrevet i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «på hver prøve plasseres en stålkule på 3.5 gram, og vannet i beholderen varmes så jevnt opp med 5 grader/min. Etersom bindemidlet mykner, siger bindemidlet og kulene gradvis ned til kontakt med en plate 25.4 mm under utgangspunktet illustrert i figur 3.7. Temperaturen i badet ved kontakt med den nedre platen kalles mykningspunkt-temperaturen, eller kule og ringverdien.». Testen utføres i duplikat, dvs to tester utføres samtidig og til slutt beregnes et gjennomsnitt av de to målte temperaturene. Hvis avviket mellom to målinger er mer enn 1 grad celsius for bitumen med mykningspunkt under 80 grader celsius, eller mer enn 2 grader celsius for mykningspunkt over 80 grader må ny test utføres(Statens vegvesen, 2014b).



Figur 3. 7: Venstre bilde viser kulene på ringen før testing og høyere bilde viser når kulene treffer bunnen samtidig.

Forberedelsen av bitumenprøvene før testing avvok noe fra standardene. For eksempel ble bitumenprøvene, kulene, magneten, mykningspunktapparatet og glassrøret med vannet plassert i et kjøleskap for å oppnå en temperatur på lavere eller lik 5 grader celsius i cirka 15-30 minutter illustrert i figur 3.8.



Figur 3. 8: Venstre bilde viser horisontalt bitumen overflate og høyre bilde viser bitumenprøvene, kulene, magneten, mykningspunktapparatet og glassrøret med vann plassert i et kjøleskap.

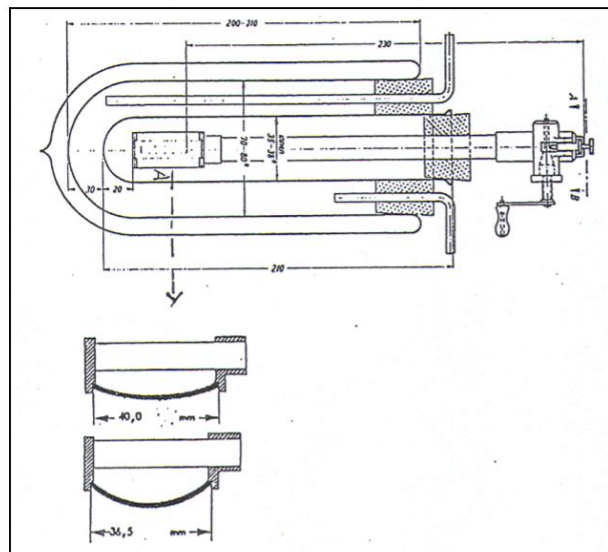
Denne delen avviker litt fra hva som er beskrevet i NS-EN 1427 og baserte seg på et råd fra en erfaren doktorgradsstudent. Denne metoden for avkjøling ble brukt fordi det var enklere å løsrive bitumenprøvene fra bakepapiet når prøvene var avkjølt. I tillegg unngikk man å skade bitumenprøvene før testing. På grunn av litt uerfaren preparering av bitumenprøvene var avkjølingstiden litt kortere enn 15-20 minutter for

noen av prøvene i forhold til Statens vegvesen håndbok «**R12 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b). Dette kan ha påvirket mykningspunkt-temperaturen for noen av bitumenprøvene som fikk lengst avkjølingstid i fryseren, fordi det krever litt lenger tid å varme opp disse prøvene.

3.5 Fraass bruddpunkt

Den praktiske utførelsen av Fraass bruddpunkt er basert på Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 12593: 2015 «Bitumen og bituminøse bindemidler. Bestemmelse av Fraass-bruddpunkt». Denne testen ble utført av Kompetansesenter ved Veidekke Industri AS i Trondheim, fordi Fraass bruddpunkt apparatet på NTNU manglet viktige komponenter og var ikke operativ.

Fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) er «Fraass-testen en såkalt lavtemperaturtest som utføres for å få et mål på bindemidlets evne til å motstå oppsprekking ved lave temperaturer.». En figur av Fraass-apparaturen er illustrert i figur 3.9.



Figur 3. 9: Fraass-apparat for bestemmelse av bruddpunkt (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Prosedyren for denne testen er også godt beskrevet i rapporten om «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «det skal smeltes en 0.5 mm tykk bindemiddelprøve på en standardisert bladfjær. Deretter festes stålfjæren med prøve mellom de to festene nederst på belastningsutstyret. Ved

utføring av forsøket avkjøles prøvebeholderen ned med 10 grader celsius per minutt, og samtidig påføres bindemiddelfilmen bøyning ved å dreie på sveiven på toppen av prøvebeholderen. Når det observeres riss i bitumenfilmen ved bøyning, leses denne temperaturen som kalles Fraass bruddpunkt.».

Fra Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS ble det rapportert via e-post at prøvene ble foroppvarmet i 180 grader celsius i cirka 10 minutter før prøvene ble testet for i Fraass bruddpunkt. Oppvarmingstemperaturen for et bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 er mellom 140-155 grader celsius som avviker dermed fra Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøker**» (Statens vegvesen, 2014). Dette skyldes kommunikasjonssvikt fra min side fordi jeg hadde ikke sendt noe informasjon om penetrasjonsgraden for prøvene til Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS.

Det er noen gjentakende svakheter ved denne testen som at det er vanskelig å utføre og resultatene er gjerne brukeravhengige. Det er også stor forskjell på hvordan prøven går til brudd sammenlignet med det som skjer i felt (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). For eksempel vil temperaturen og belastningen variere ute på trafikken og ikke være under konstante forhold som i laboratoriet.

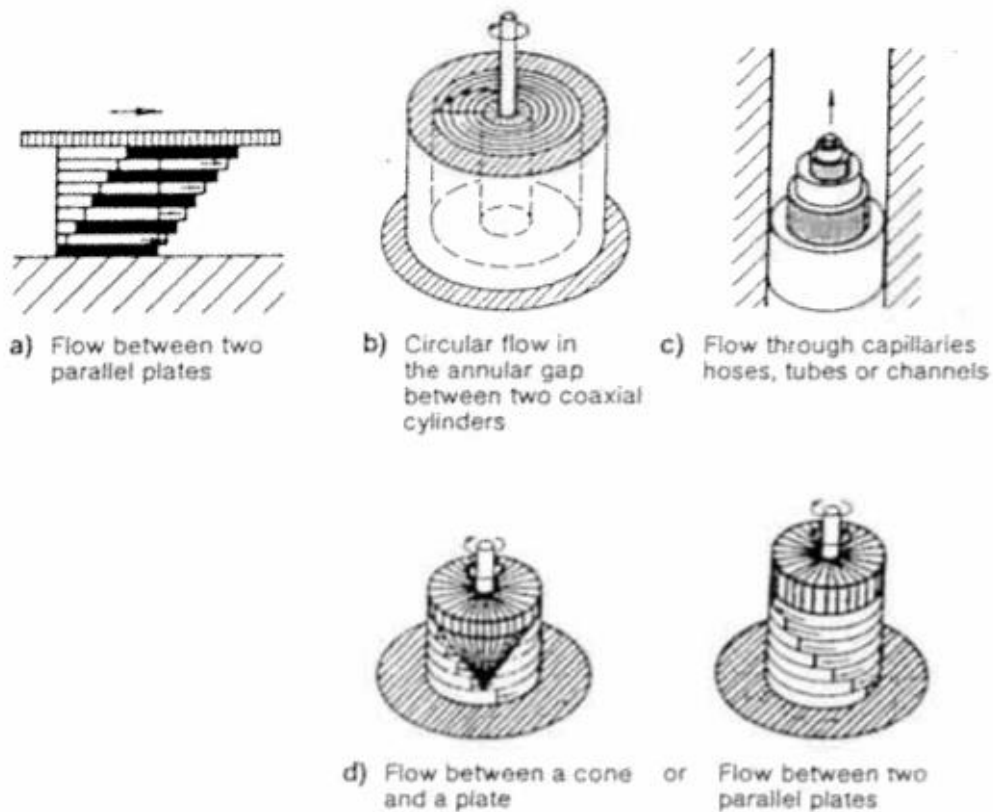
3.6 Viskositet

Det ble ikke utført noe viskositetsmåling i denne masteroppgaven, men beskrivelsen i dette delkapitlet vil være et teoretisk rammeverk for begreper som blir anvendt senere i masteroppgaven.

En god måte å forklare viskositet på er hentet fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «ved blanding av bindemiddel og steinmaterialet er det viktig at bindemidlet har riktig flytende konsistens for at sluttproduktet skal bli bra. Konsistens for lettflytende væsker måles best med viskositet. På samme måte som E-modul er et mål på motstandsevne mot deformasjoner i elastiske materialer, er viskositet et mål på motstandsevnen mot deformasjoner i viskøse materialer.».

Dermed kan viskositeten fortelle noe om væsken er tungt eller lettflytende. Jo høyere viskositet, desto lavere vil flyteevnen være (tungtflytende) og jo lavere viskositet,

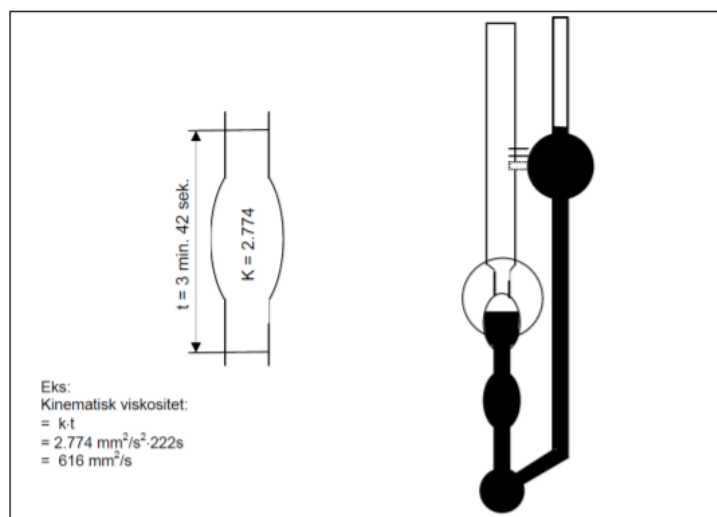
desto høyere flyteevne (lettflytende). Viskositet kan måles på forskjellige måter illustrert i figur 3.10.



Figur 3. 10: Ulike metoder for å måle viskositet(Andersen, 1996).

3.6.1 Kinematisk viskositet

En måte å måle viskositet på er ved hjelp av såkalte kapillar-viskosimetre. Beskrivelsen av denne testen er også hentet fra rapporten om «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «i et kapillarviskosimeter måler vi tiden det tar for en viss væskemengde å strømme gjennom et standardisert og kalibrert rør.». Et vanlig apparat å bruke er den såkalte Cannon-Fenske kapillarviskosimeter i figur 3.11.



Figur 3. 11: Cannon-Fenske kapillarviskosimeter (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Prosesen for denne testen er også hentet fra rapporten om «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at når «viskosimeteret er snudd opp ned blir bindemiddelprøven suget inn i den øverste kuleformede utvidingen på det ene røret. Vi stenger røret med korker og setter kapillarviskosimeteret ned i et bad med konstant temperatur. Etter en hvis oppvarming fjernes korken og bindemidlet strømmer fra kuleformede reservoaret ned gjennom røret og opp til de kuleformede utvidingene i det oppadgående røret. Vi måler tiden som går med for å fylle hver av disse små kulene mellom avmerkede linjer. Slike viskosimeter er kalibrert opp mot væsker med kjent viskositet. Ved å dele den kalibrerte viskositeten på tiden det tar å strømme mellom avstandsmerkene, får man en kalibreringsfaktor som gjelder for det aktuelle viskosimeteret. Når man så siden skal måle viskositet på f.eks bindemidler, tar man tiden mellom avstandsmerkene og ganger med kalibreringskonstanten som i formel 1. Denne viskositeten kalles kinematisk viskositet, benevnelsen er mm²/s. E.».

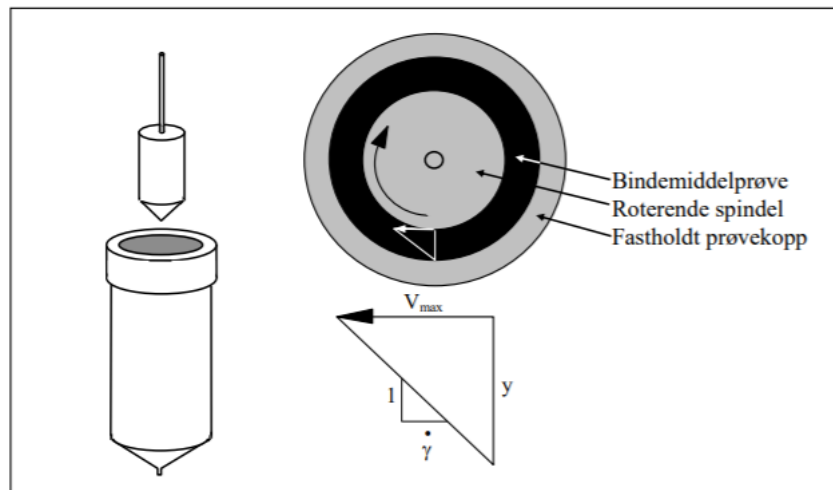
$$v = C * t \quad (1)$$

Hvor:

- v=Kinematisk viskositet [mm²/s]
- C=Kalibreringskonstanten til viskosimeteret [mm²/s²]
- t= Gjennomstrømningstid [s]

3.6.2 Dynamisk viskositet

En annen måte å måle viskositet på er fra den klassiske fluidmekanikken som definerer viskositet som forholdet mellom skjærspenning og skjærhastighet (Nordahl, Andersen and Mork, 2018). Figur 3.12 illustrerer hvordan viskositeten kan måles i et såkalt rotasjonsviskosimeter.



Figur 3. 12: Måling med dynamisk viskositet med rotasjonsviskosimeter (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Prosedyren for dynamisk viskositet er godt beskrevet i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «en bindemiddelprøve helles opp i prøvebeholder, spindelen senkes ned, og det hele temperes til ønsket temperatur. Forutsatt at det ikke «glipper» mellom metall og bindemiddel, vil det når spindelen roteres med en fast hastighet, bygges opp et hastighetsprofil i bindemiddelet som går fra 0 ved prøvebeholderens overflate til en annen maksimal hastighet ved spindelens overflate.».

Videre i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) blir «materialets skjærhastighet $\dot{\gamma}$ definert som $\dot{\gamma} = \frac{V_{max}}{y} = \frac{1}{s}$, og materialets viskositet η som forholdet mellom skjærspenning og skjærhastighet gitt i formel 2».

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

Der:

η : dynamisk viskositet (Pa*s)

τ : skjærspenning (Pa=N/m²)

$\dot{\gamma}$: skjærhastighet (s⁻¹)

Som enhet for dynamisk viskositet brukes også poise, P, og en har at 1Pa*s=10 poise.

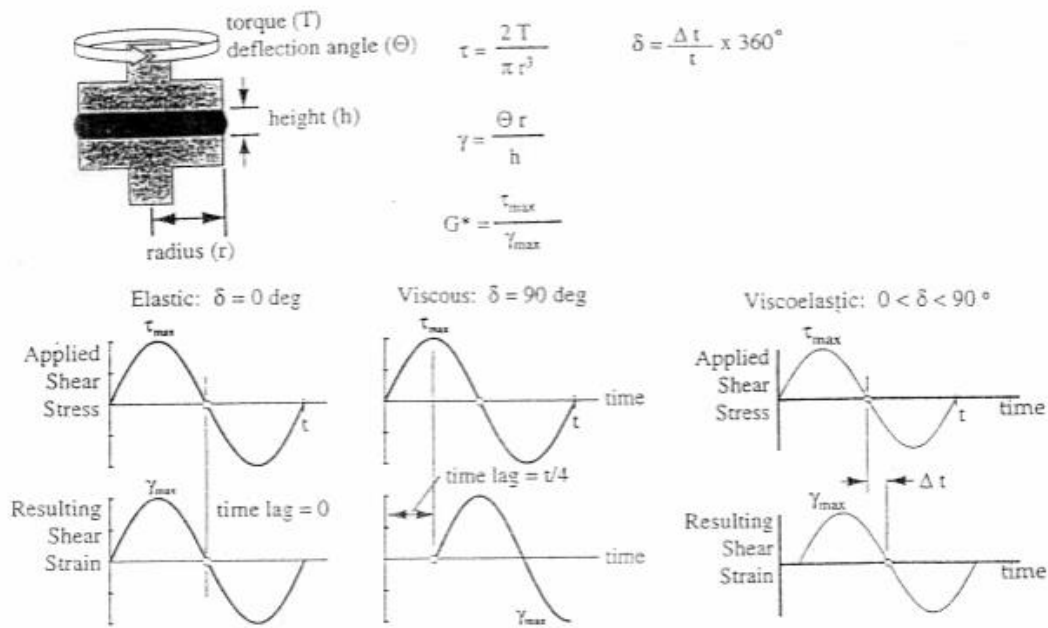
Den prinsipielle forskjellen mellom måling av dynamisk og kinematisk viskositet er hentet fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «ved måling av dynamisk viskositet påføres en kraft som fører til strømning, mens ved måling av kinematisk viskositet er det tyngdekraften som fører til strømning. Man kan omregne kinematisk viskositet til dynamisk viskositet ved å multiplisere viskositeten med væskens densitet ved aktuell prøvingstemperatur».

3.7 Dynamisk Skjær Reometer

Den praktiske utførelsen av dynamisk skjær reometer er basert på Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 14770: 2012 «Bitumen og bituminøse bindemidler. Bestemmelse av kompleks skjærmodul og fasevinkel. Dynamisk Skjær Reometer (DSR)».

Fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Andersen, 1995) blir «Dynamisk Skjær Reometer (DSR) benyttet for å måle de viskoelastiske egenskapene til bindemidler. Målingene som utføres ved å påføre en dynamisk sinusformet belastning som kan utføres ved ulike temperaturer, spenningsnivå, tøyingsnivå og frekvenser.».

I figur 3.13 blir en sinusformet spenning eller tøyning påført materialet og responsen i form av tøyning eller spenning i materialet registreres.



FIGUR 4.1 Virkemåte for dynamisk skjær-reometer /4/

Figur 3. 13: Virkemåte for Dynamisk Skjær Reometer (Andersen, 1995).

Et av de viktigste materialparameterene som kommer ut fra dynamisk testing er den såkalte kompleksmodulen G^* . Kompleksmodulen er en dynamisk skjær-modul som beregnes etter formel 3:

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (3)$$

Der:

G^* : Kompleksmodul (kPa)

τ : Skjærspenning (kPa)

γ : Skjærtøyning (ingen enhet)

I tillegg er fasevinkelen (δ) en meget viktig viskoelastisk parameter. For rent elastiske materialer vil fasevinkelen være lik 0 grader celsius, mens den for rent viskøse materialer vil være 90 grader celsius (Andersen, 1995).

Det er funnet gode sammenhenger mellom parameteren som kombinerer kompleksmodulen og fasevinkelen og vanlig nedbrytningsmekanismer. For eksempel har man funnet god sammenhengen mellom $G^*/\sin \delta$ og Wheel track test, dvs deformasjonstesting av asfaltmasser (Andersen, 1995). Dermed har man

kommet fram til at $G^*/\sin \delta$ bør minimum være lik 2.2 kPa i «**SHRP**»-bindemiddelspesifikasjon (Andersen, 1995) for å sikre at bindemidlet har gode deformasjonsegenskaper. Derimot vil dette forholde alene ikke være en god nok indikator for deformasjonspotensialet i en asfaltmasse. Her må også hulrom i asfaltmassen og egenskaper ved tilslaget bli tatt hensyn til (Andersen, 1995).

Ved å forlange at $G^*\sin \delta < 5000$ kPa mener man å ha kontroll på utmattingsskader, fordi det er observert sammenheng mellom bindemiddelparameteren $G^*\sin \delta$ og grad av utmattingssprekker på en forsøksstrekning (Andersen, 1995).



Figur 3. 14: Dynamisk Skjær Reometer apparat med ring og bitumenprøve.

Oppvarmingstiden var noe lenger for bitumenprøvene etter kortidsaldring i forhold til standarden NS-EN 14770 som har satt krav om maksimalt 30 minutters oppvarming for prøver med vekt på 50 til 100 gram. Dette kommer litt av uerfaren bruk av NS-EN 14770. Prøvene ble slått for å størkne i romtemperatur etter oppvarming på et bakepapir og deretter formet til en liten bitumen-kule før testing i figur 3.14. Før testen begynner må frekvensen innstilles på 10 radianer/sekund og en temperaturintervall som spenner fra 30 til 80 grader celsius. Deretter settes et nullgap slik at DSR apparatet forstår at prøven skal ha en tykkelse på 1 mm. Når prøven settes inn endres temperaturen til 40 grader celsius. Deretter trykkes bitumenprøven til en

tykkelse på 1.035 mm før prøven trimmes med en oppvarmet spatel. Etter trimming resettes temperaturen til starttemperaturen på 30 grader celsius. Deretter kan selve testen begynne. Reometer-programmet beregner kompleksmodulen G^* og fasevinkelen δ kontinuerlig til prøven er ferdig etter cirka 15-30 minutter. Etter at testen er ferdig blir resultatene presentert som et excel skjema illustrert i vedlegg 4.

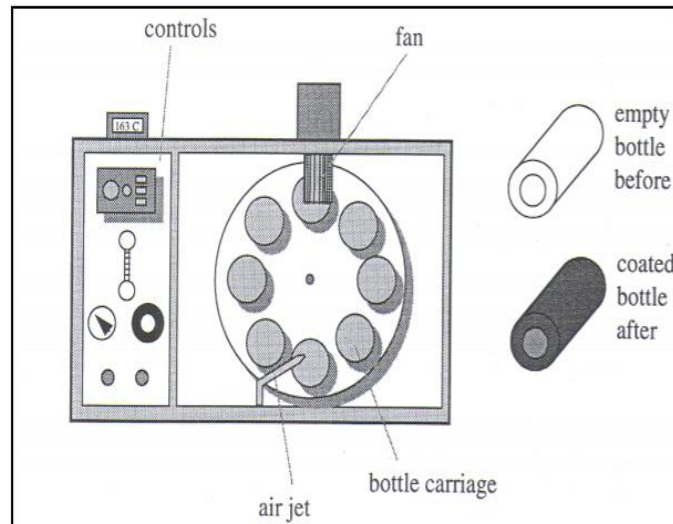
3.8 Aldringsforsøk

Aldring er godt forklart i rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) og sier at «ved all varmeblanding av asfalt vil bindemidlet i større eller mindre grad herde. Flyktige komponenter fordamper, og bindemidlet reagerer med oksygen i luften slik at bindemidlet blir stivere. Denne prosessen kalles aldring og gjerne kortidsaldring for å understreke at de er snakk om herding som skjer under blanding og utlegging av asfaltmassen. Aldring av bindemidlene vil også fortsette ute i felt under påvirkning av vær og vind. Denne prosessen kalles langtidsaldring som er en oksyderings prosess som skjer i et langt lavere tempo.».

3.8.1 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

Den praktiske utførelsen av Rolling Thin Film Oven Test er basert på Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 12607: 2014 «Bitumen og bituminøse bindemidler. Bestemmelse av motstand mot herding under påvirkning av varme og luft. Del 1: RTFOT-metode».

For denne masteroppgaven ble bitumenprøven etter RTFOT testet i følgende tester: mykningspunkt, Fraass bruddpunkt, DSR og videre i trykkaldringskammer (Pressure Aging Vessel (PAV)). I DSR var målet å finne en øvre temperaturgrense basert på «**SHRP**» bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) og analysere deformasjonsmekanismen etter kortidsaldring. Samtidig vil bitumenprøvene fra RTFOT-apparatet bli benyttet for å se på endring av lavtemperaturoppspreking-motstand ved Fraass bruddpunkt etter kortidsaldring. En prinsippskisse av Rolling Thin Film Oven apparatet er illustrert i figur 3.15.



Figur 3. 15: Prinsippskisse (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

Fremgangsmåten for RTFOT er i henhold til NS-EN 12607 som angir en temperatur på 163 grader celsius og at bitumenprøvene skal ha en vekt på cirka 35 gram av de ulike bitumenprøvene plassert i 8 glass illustrert i figur 3.16.



Figur 3. 16: Bilde av fremgangsmåten for Rolling Thin Film Oven apparat, innsiden av apparatet og bitumen i glassene før og etter RTFOT.

Det ble gjennomført 2 kjøringer i RTFOT. Den første RTFOT ble utført for å gjennomføre bindemiddeltester etter kortidsaldring. Den andre RTFOT ble gjennomført for å testes videre i trykkaldningskammer (PAV). Det var litt tap av bitumen i glasset etter RTFOT fra figur 3.17.



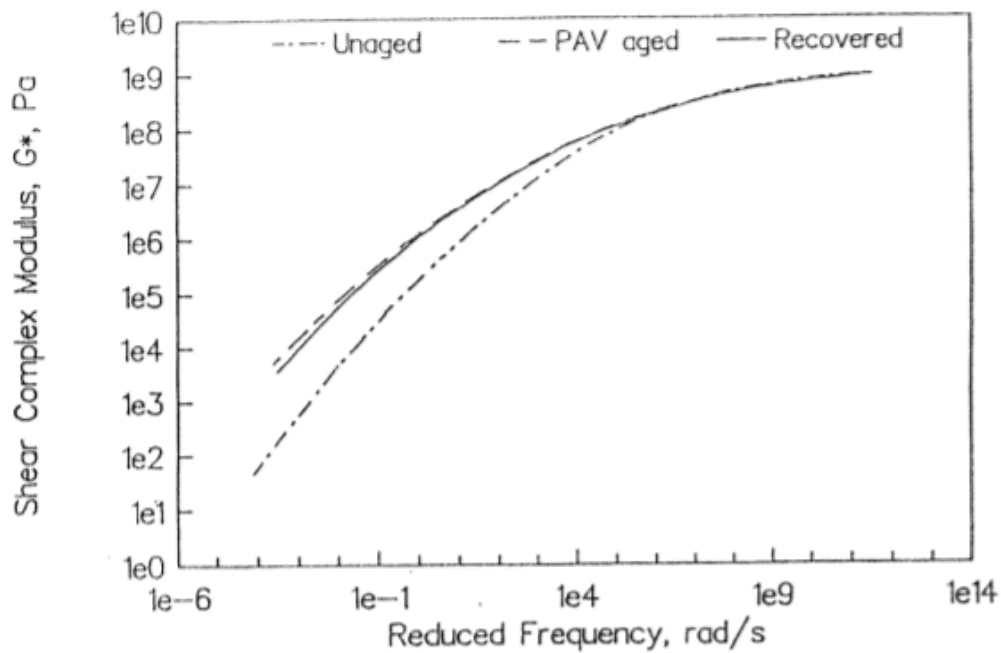
Figur 3. 17: Tap av bitumen i glass etter RTFOT testen.

3.8.2 Pressure Aging Vessel Test (PAV)

Den praktiske utførelsen av Pressure Aging Vessel (PAV) er basert på Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelser**» (Statens vegvesen, 2014b) og NS-EN 14769: 2012 «Bitumen og bitumniose bindemidler. Akselerert langtidsaldring med trykkbeholder for aldring (PAV)». Langtidsaldring ble utført av Kompetansesenteret ved Veidekke Industri AS, fordi PAV apparatet på NTNU ikke virket som normalt.

Målet med å bruke PAV er å undersøke bindemiddelegenskapene etter langtidsaldring. Bitumenprøvene som var langtidsaldret ble videre testet for mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og DSR.

Fra rapporten «**Bituminøse bindemidler**» (Andersen, 1995) vil «de fysiske og kjemiske endringene som skjer med bindemidlene under denne behandlingen være svært lik de endringene som skjer med bindemidlet i et asfaltdekke over lang tid i felt» (Andersen, 1995). Basert på et empirisk forsøk i figur 3.18 ble kompleksmodul som funksjon av belastningsfrekvens for et ikke aldret utgangsbindingemiddel, for det samme bindemidlet gjenvunnet fra et asfaltdekke etter 8 år felteksponering og etter aldring i trykkaldringskammer testet. Fra forsøket ser man at trykkaldring gir en aldringseffekt som er svært lik det som skjer ved langtidsaldring i felt.



Figur 3. 18: Kompleksmodul som funksjon av frekvens for et bindemiddel i ikke aldret tilstand, i trykkaldret tilstand og gjenvunnet etter 8 års felteksponering (Andersen, 1995).

Det ble ikke oppgitt noe detaljert prosedyre for hvordan PAV ble utført av Kompetansesenteret ved Veidekke Industri AS, utenom at prøvene ble testet i henhold til prosedyren angitt i NS-EN 14769. I tillegg ble det sendt via e-post informasjon om at 40 gram av hver bitumenprøve ble foroppvarmet i cirka 10 minutter under 180 grader celsius før testing i PAV. noe som avviker fra 50 gram av hver bitumenprøve i standarden NS-EN 14769. Dette er fordi det ble oversendt for lite bindemiddel til Kompetansesenteret. Trykkaldningskammeret på NTNU er illustrert i figur 3.19.



Figur 3. 19: Figur av bitumen beholder og trykkaldningskammer.

Kapittel 4: Eksperimentelt arbeid

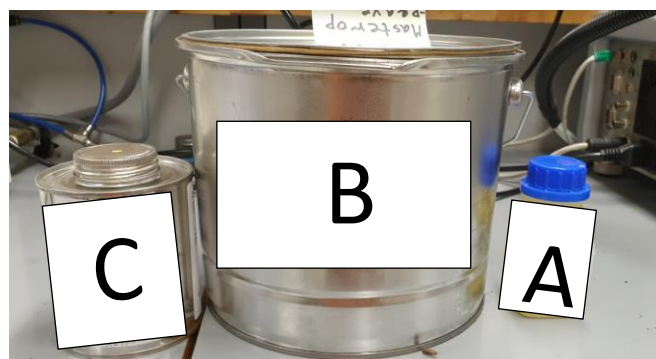
Formålet med denne oppgaven er å undersøke effekten av å tilsette 3 ulike rejuvenatorer på bindemiddelegenskapene i aldret bitumen og sammenligne det opp mot referanseprøven på 70/100 bitumen. Oppgaven skal teste 3 ulike rejuvenatorer blandet med 50 % gjenvunnet-bitumen (Gjb) og 50% av 70/100 ferskt bitumen. Samtidig er det en referanseprøve som har 100% ferskt bitumen med penetrasjonsverdi på 70/100. Selve ekstraksjonen av aldret bitumen ble utført ved Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS i Trondheim. Deretter ble alle testene utført på laboratoriet i NTNU, utenom Fraass bruddpunkt og langtidsaldring i trykkaldrings-kammer (PAV) som ble gjennomført ved Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS.

Trinnene for innblanding av rejuvenatorene og testene er gjennomført på følgende måte:

- a) Beregning av bindemiddelbehov til de ulike testene.
- b) Forundersøkelse for å beregne blandingsforhold for de ulike rejuvenatorene.
- c) Beregning av tilsetninger av de ulike rejuvenatorene.
- d) Blandingen av prøvene til de ulike analysene.
- e) Utførelse av testene beskrevet i teoridelen.
- f) Analysere resultatene fra de ulike testene og sammenligne rejuvenatorene.

4.1 Beskrivelse av produktene

Prøvene som ble brukt var ferskt 70/100 bitumen, aldret bitumen ekstrahert fra gjenbruksasfalten, Rejuvenator A, B og C. De tre rejuvenatorene er illustrert i figur 4.1.



Figur 4. 1: Rejuvenatorene A, B og C.

Det ble sendte rundt 3 liter med 70/100 ferskt bitumen og 821 gram med aldret bitumen.

4.2 Beskrivelse av bindemiddelbehov i det eksperimentelle arbeidet

I Tabell 4.1 er det gitt en oversikt på endelig blandingsforhold som gjelder for de ulike prøvene, totalt mengde for hver prøve i gram og hvilken test det gjelder.

Tabell 4. 1 Oversikt over bindemiddelbehov for de ulike testene i forarbeidet.

Lab.nr.	Beskrivelse av prøvene	Penetrasjon	Mykningspunkt + DSR	Fraass bruddpunkt
P1	100% av 70/100 bitumen (referanseprøve)	60 g	30 g	20 g
P2	50 % av Gjb +5 % av Rejuvenator A+50 % av 70/100 bitumen		30 g	20 g
P3	50 % av Gjb +5,6 % av Rejuvenator B+50 % av 70/100 bitumen		30 g	20 g
P4	50 % av Gjb +3 % av Rejuvenator C +50 % av 70/100 bitumen		30 g	20 g
P5	100 % av aldret bitumen (Gjb)	60 g	30 g	20 g

Prøve nummer 1 er en referanseprøve med 100% ferskt bitumen som har penetrasjonsgrad på 70/100. For denne prøven ble det utført penetrasjon, mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og DSR. Årsaken for å bruke et bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 er å oppnå høy stivhet og dermed god motstand mot permanente deformasjoner for vegger med store trafikkmengder. For eksempel kan bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 bitumen bli brukt i Asfaltbetong (Ab) for årlig-døgngjennomsnitt-trafikk (ÅDT) over 15000 i en eldre versjon av Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018) i figur 632.3.

Prøve nummer 2 til 4 har alle et 50/50 blandingsforhold, som betyr at det vil være 50 % ferskt bitumen med penetrasjonsgrad 70/100 og 50 % av aldret bitumen som er tilsatt en av rejuvenatorene i tabell 4.1 i forhold til vekten av aldret bitumen.

Bakgrunnen for å blande 50% av ferskt 70/100 bitumen var for å spare mengden

aldret bitumen som skal brukes i det eksperimentelle arbeidet. I tillegg var det fordi selve 50/50 blandingsforholdet er basert på en oppskrift som heter «**Blandeprosedyre av rejuvenator**» (KFA, 2020) av Kontrollordning For Asfaltgjenvinning .

For prøve 5 som er aldret bitumen var det allerede gjennomført en penetrasjon og mykningspunkt-test ved Kompetansesenteret i Veidekke Industri AS i vedlegg 0. Det ble det utført en kontrollsjekk på reproduserbarhet av penetrasjon og mykningspunkt når aldret bitumen ble testet ved laboratoriet i NTNU.

Hensikt og utførelsesmetoden for alle de ulike testene er beskrevet i detaljer i metode kapitlet.

4.3 Estimering av rejuvenator-mengden basert på viskositet til prøvene

Det ble det utført en estimering av rejuvenator-mengder basert på dynamisk viskositet ved 60 grader celsius. Det ble brukt empiriske verdier for dynamisk viskositet for gjenvunnet-bitumen (Gjb) og 70/100 ferskt bitumen. Dette fordi det ikke var tilgjengelige laboratoriet-utstyr på NTNU for å måle viskositetene. Fra tabell 4.2 ble det hentet noen typiske verdier for dynamisk viskositet ved 60 grader celsius for de ulike rejuvenatorene og 70/100 bitumen fra Kontrollordning For Asfaltgjenvinning i rapporten «**Blandeprosedyre for rejuvenator**» (KFA, 2020). Den dynamiske viskositeten for rejuvenatorene stemmer også godt med målte verdier fra en masteroppgave som undersøkte effekten av de samme rejuvenatorene på gjenbruksasfalt (Yousef and Aslam, 2019)

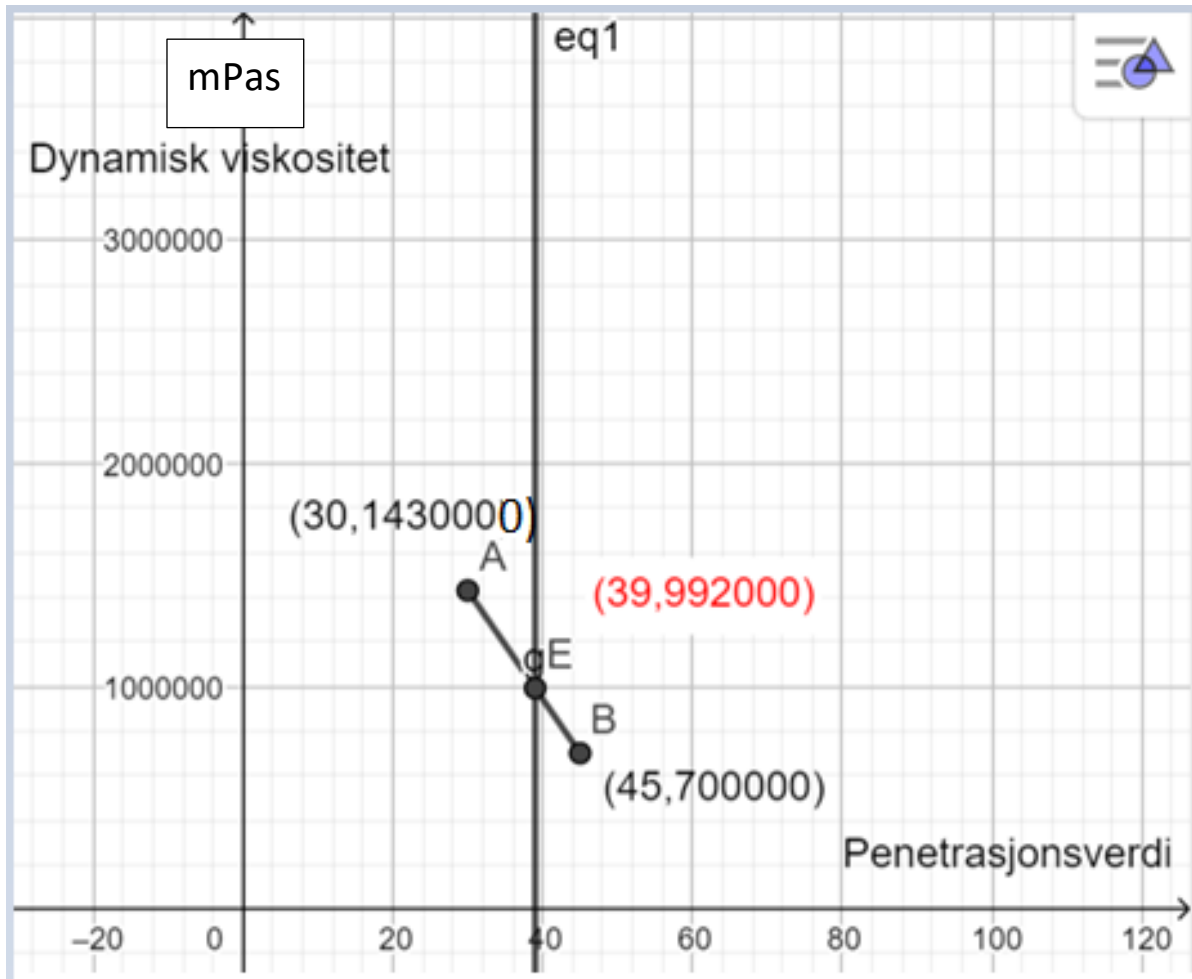
Tabell 4. 2: Oversikt over dynamisk viskositet ved 60 grader celsius for de ulike produktene.

Produkt	Dynamisk viskositet 60 ° C, mPas	Kilde
Rejuvenator A	22	(KFA, 2020)
Rejuvenator B	32	(KFA, 2020)
Rejuvenator C	3	(KFA, 2020)
100% av 70/100 bitumen	200000	(KFA, 2020)
100% av aldret bitumen (Gjb) med penetrasjonsverdi på 39	992000 *	Estimert
100 % av aldret bitumen med penetrasjonsverdi på 30	1430000	(KFA, 2020)
100 % av aldret bitumen med penetrasjonsverdi på 45	700000	(KFA, 2020)

Det ble estimert en dynamisk viskositet for aldret bitumen ved å bruke linear interpolasjon med utgangspunkt i empiriske verdier for penetrasjon og dynamisk viskositet fra Kontrollordning For Asfaltgjenvinning i rapporten «**Blandeprosedyre for rejuvenator**» (KFA, 2020). Deretter ble de empiriske verdiene plottet for aldret bitumen med penetrasjonsverdiene 30 og 45 fra tabell 4.2 langs den horisontale akse i figur 4.2. I tillegg ble de tilsvarende dynamiske viskositetene langs den vertikale akse plottet i figur 4.2. Deretter ble det laget en vertikal linje med penetrasjonsverdi på 39 for aldret bitumen fra vedlegg 0 og dermed kan man finne et skjæringspunkt med den lineære linjen. Den estimerte verdien for dynamisk

viskositet ble 992000 mPas ved 60 grader celsius for aldret bitumen med penetrasjonsverdi på 39.

Den faktiske verdien for dynamisk viskositet for aldret bitumen vil kunne variere i forhold til den estimerte verdien, fordi endringen av viskositet mot penetrasjon trenger ikke å være linear.



Figur 4. 2: Interpolert verdi for dynamisk viskositet basert på penetrasjonsverdi fra aldret bitumen i punkt E (farget rødt).

4.4 Beregning av rejuvenator-mengden basert på dynamisk viskositet ved 60 grader celsius

Verdiene fra viskositet i tabell 4.2 ble brukt for å beregne mengden rejuvenator som trengs for å oppnå en penetrasjonsgrad på 70/100. Fra rapporten «**Blandeprosedyre for rejuvenator**» (KFA, 2020) er det gitt en empiriske dobbelt-logaritmisk formel for å beregne andelen av en rejuvenator. Andelen rejuvenator kan beregnes basert på formel 4:

$$B = \frac{\log\log V_a - \log\log V}{\log\log V_a - \log\log V_b} \quad (4)$$

V: Dynamisk viskositet ved 60 grader celsius i blandingen [mPa*s]
 Va: Dynamisk viskositet ved 60 grader celsius i komponent a [mPa*s]
 Vb: Dynamisk viskositet ved 60 grader celsius i komponent b [mPa*s]
 A: Andel granulatbitumen
 B: andel rejuvenator
 A+B=1

Formel 4 ga følgende tilsetninger av de ulike rejuvenatorene i vektprosent i forhold til den totale vekten av aldret bitumen.

Rejuvenator A $\frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 22} = 8 \%$

Rejuvenator B $\frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 32} = 9 \%$

Rejuvenator C $\frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 3} = 5 \%$

Det er vanskelig å vurdere om de estimerte mengdene av rejuvenator er tilstrekkelig for å oppnå en penetrasjonsgrad på 70/100 for aldret bitumen. Dette er fordi det er knyttet usikkerhet i estimatet for viskositeten til aldret bitumen. Samtidig er blandetemperaturen i blandedeprosedyren i «**ASTM D 4887**» ulikt det som er anbefalt i Statens vegvesen håndbok «**R210 Laboratorieundersøkelse**» (Statens vegvesen, 2014b). Det ble tatt en kontrollsjekk av Rejuvenatoren A ved å gjennomføre et penetrasjonsforsøk og mykningspunkt test for å vurdere om den estimerte rejuvenator-mengden er nok for å oppnå en penetrasjonsgrad på 70/100 bitumen i neste delkapittel.

4.5 Beskrivelse og resultater av forarbeidet ved gjennomføring av bindemiddeltester for å bestemme rejuvenator-mengdene

Aldret bitumen og 70/100 bitumen ble satt i et varmeskap på 110 grader celsius i 1 timer med manuell røring etter 30 minutter. Videre ble de ulike prøvene fordelt i mindre beholdere illustrert i figur 4.3.



Figur 4. 3: Aldret og ferskt bitumen fordelt i mindre prøvebeholdere.

Dette ble gjort for å ha samme forhold til oppvarming når aldret bitumen skal testes i ulike dager blandet med rejuvenatorene. Samtidig ble det enklere å utføre blanding med rejuvenatorene og aldret bitumen ved å bruke mindre mengder. Det var også enklere å kontrollere forbruk og lagring av aldret bitumen. Dette var viktig fordi det var mindre mengder aldret bitumen i forhold til 70/100 ferskt bitumen.

Det ble benyttet en generell blandingsprosedyre for tilsetning av rejuvenator basert på blandeprosedyren «**ASTM D 4887**». Hovedstegene for blandeprosedyren med rejuvenator er som følger:

- Gjenvunnet bitumen blir smeltet opp i varmeskap ved 130 grader celsius i cirka 1 time.
- Aldret bitumen blir rørt med glasstav og inneholde blir veid i tarert prøveboks.
- Deretter blir estimert mengde rejuvenator tilsatt dråpevis med plastpipette til prøveboks.
- Videre blir blandingen rørt med glass-stav i 30 sekunder og satt tilbake i varmeskap i 10 minutter.
- Til slutt blir blandingen rørt på nytt i 30 sekunder i 5 minutters intervaller ved 135 grader celsius. Det betyr cirka omrøring i 30 minutter til sammen.

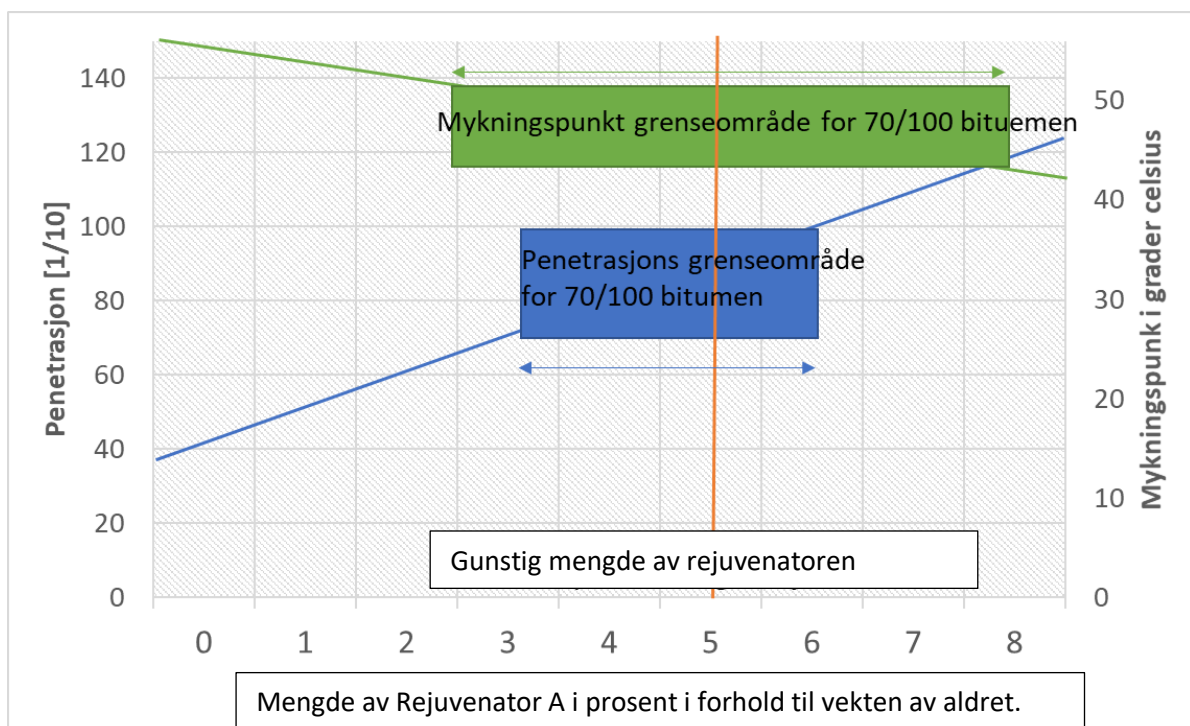
For prøver som ikke ble tilsatt rejuvenator ble de satt i et varmeskap på 130 grader celsius i cirka 1 time og 45 minutter for å ha cirka lik oppvarmingstid som rejuvenator-prøvene for bindemiddeltesting før aldring. Dette gjelder i hovedsak for den ferske bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 og 100% aldret bitumen.

Etter at den generelle blandedprosedyren var ferdig, ble de ulike bindemiddeltestene gjennomført. I tabell 4.3 er det utført et forarbeid for de ulike bitumenprøvene. I dette forarbeidet ble det bare tilsatt rejuvenator i 100 % aldret bitumen og ikke noe 70/100 bitumen. Dette ble gjort for å undersøke om den estimerte rejuvenator-mengden ville oppnå samme penetrasjonsgrad som en 70/100 bitumen, uten å ta hensyn til effekten av å tilsette noe 70/100 bitumen. Det ble gjennomført bindemiddeltester som mykningspunkt, penetrasjon og DSR. Penetrasjon og mykningspunkt-kravet for et 70/100 bitumen ble ikke oppfylt for Rejuvenatoren A i tabell 4.3. Denne prøven oppfylte penetrasjon og mykningspunkt kravet for en mykere bitumen med penetrasjonsgrad på 100/150. Samtidig har prøven en lavere stivhet i form av kompleksmodul ved 30 grader celsius i forhold til referanseprøven på 70/100 bitumen. Dermed var rejuvenator-mengden overestimert for å oppnå en penetrasjonsgrad på 70/100 ferskt bitumen. For å unngå overestimerte verdier for de andre rejuvenatorene ble rejuvenator-mengden nedjustere før videre testing i tabell 4.3.

Tabell 4. 3: Mengdeforhold for aldret bitumen blandet med bare rejuvenator, 70/100 bitumen og aldret bitumen (Gjb) gitt i gram. I tillegg er kravene for penetrasjon og mykningspunkt hentet fra Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018).

Prøvebeskrivelse	Mengde aldret bitumen i [gram]	Mengde rejuvenator i [gram]	Sum i [gram]	Penetrasjons-verdi [1/10 mm]	Mykningspunkt [° C]	Kompleksmodul G*[Kpa] ved 30 [°C]	Fasevinkel ved 30 [°C]	Penetrasjonskrav [1/10]	Mykningspunkt krav i [°]
100% av 70/100 bitumen(referanse)	0		80	85,1	46,9	134	70	70/100	43-51
50 % av Gjb + 8 % av Rejuvenator A	79,81	6,94	86,75	124,7	42,2	76	72	70/100	43-51
50 % av Gjb +5,6 % av Rejuvenator B	80,32	4,79	85,11	71,4	49,8	54	60	70/100	43-51
50 % Gjb + 3 % av Rejuvenator C	86,52	2,79	89,31	98,1	45,3	80	70	70/100	43-51
100% av aldret bitumen (Gjb)	85,31	0	85,31	41,0	55,3	587	64		

Det var to prøver fra Rejuvenator A blandet med bare aldret bitumen som var testet for mykningspunkt og penetrasjon med ulike rejuvenator-mengder i forhold til vekten av aldret bitumen. Da kan man basert på European Asphalt Pavement Association plote inn penetrasjon, mykningspunkt og kravene i et diagram (EAPA, 2018) illustrert i figur 4.4. Penetrasjonsverdiene ble plottet langs penetrasjonsaksen med penetrasjonskravområde for referanseprøven (Statens vegvesen, 2018) i figur 4.4. Tilsvarende ble mykningspunktet plottet langs mykningspunkt aksen med mykningspunkt-kravområde for referanseprøven (Statens vegvesen, 2018) i figur 4.4. En gunstig mengde av Rejuvenatoren A er markert som orange linje og som går igjennom begge kravområdene ved 5 % vekt av aldret bitumen i figur 4.4.



Figur 4. 4: Gunstig mengde av Rejuvenatoren A for å oppnå penetrasjonsgrad på 70/100 i aldret bitumen.

Videre ble rejuvenator-mengden nedjustert for Rejuvenatoren B og Rejuvenatoren C med et forholdstall på 5/8, som er forholde mellom gunstig mengde av Rejuvenatoren A delt på den første estimerte rejuvenator-mengden. Dette ble gjort for å unngå at de resterende rejuvenatorene ikke skulle ha overestimerte rejuvenator-mengder og dermed gi en for myk penetrasjonsgrad for videre testing. Samtidig var det begrenset med aldret bitumen for å gjøre flere penetrasjon og mykningspunkt-tester for de to andre rejuvenatorene og finne en gunstig rejuvenator-mengde. Ny mengde av Rejuvenator B ble 5,6 % i forhold til vekten av aldret

bitumen og ny mengde av Rejuvenator C ble 3,0 % i forhold til vekten av aldret bitumen.

$$\begin{aligned} \text{Rejuvenator A} & \quad \frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 22} = 8\% * \frac{5}{8} = \mathbf{5\%} \\ \text{Rejuvenator B} & \quad \frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 32} = 9\% * \frac{5}{8} = \mathbf{5,6\%} \\ \text{Rejuvenator C} & \quad \frac{\log\log 992000 - \log\log 200000}{\log\log 992000 - \log\log 3} = 5\% = \frac{5}{8} = \mathbf{3,0\%} \end{aligned}$$

Etter å ha nedjustert rejuvenator-mengden for Rejuvenator B og C ble disse testet for penetrasjon, mykningspunkt og DSR. Basert på tabell 4.3 oppfylte disse nye rejuvenator-mengdene både penetrasjon og mykningspunkt-kravet for en 70/100 ferskt bitumen. Det var inkludert noen feilkilder og avvik i både penetrasjon og mykningspunkt-testen. I tillegg avviker stivheten i form av kompleksmodulen for Rejuvenator B og Rejuvenator C fra 70/100 bitumen i tabell 4.3. For å være mer sikker på gunstig rejuvenator-mengde for Rejuvenator B og Rejuvenator C bør det utføres flere penetrasjon og mykningspunkt-tester med ulike rejuvenator-mengder.

Etter at den generelle blandingsprosedyren over var fullført og endelig mengde rejuvenator var bestemt kan 50 % av 70/100 ferskt bitumen tilsettes i blandingen for å simulere en 50 % gjenbruk av bindemiddel. Den ferske bitumen må også varmes opp samtidig som blandingsprosedyren foregår ved 130 grader celsius før den til slutt blandes med aldret bitumen og rejuvenatorene.

4.6 Endelige rejuvenator-mengder

Tabell 4.4 oppsummerer de endelig rejuvenator-mengdene brukt i masteroppgaven.

Tabell 4. 4: Endelig rejuvenator-mengder i % i forhold til vekten av aldret bitumen.

Navn	Rejuvenator-mengder i %.
Rejuvenator A	5
Rejuvenator B	5.6
Rejuvenator C	3

Kapittel 5: Diskusjon og resultater fra det eksperimentelle arbeidet

Denne delen presenterer resultatene for de gjennomførte laboratorieundersøkelsene samlet på en systematisk måte og resultatene diskuteres nærmere.

Forskningsspørsmålet for denne masteroppgaven handlet om å undersøke effekten av 3 ulike rejuvenatorer på bindemiddelegenskapene i aldret bitumen og sammenligne det opp mot referanseprøven på 70/100 bitumen. Med bakgrunn i forskningsspørsmålet vil jeg svare på dette ut ifra 4 ulike innfallsvinkler.

Første innfallsvinkel vil basere seg på å sammenligne resultatene fra bindemiddeltestene opp mot kravene gitt i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) i figur 3.1. Dette ble utført for å se om rejuvenator-prøvene blandet med aldret bitumen oppfyller standardkravene som er satt av Staten vegvesen. Samtidig vil dette avsløre om rejuvenatorene blandet i aldret bitumen kan brukes i praksis. Det ble utført mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og kortidsaldring fra Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018).

Andre innfallsvinkel vil være å sammenligne resultatene for rejuvenator-prøvene blandet med aldret bitumen opp mot referanseprøven på 70/100 bitumen. Dette er viktig fordi målet var å undersøke om de ulike rejuvenator-prøvene blandet med aldret bitumen kunne oppnå de samme bindemiddelegenskaper som et ferskt bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 og bli brukt på høytraffikerte veger.

Tredje innfallsvinkel vil være å sammenligne resultatene opp mot Performance Graded Asphalt Binder Specifications i figur 3.2 fra «**SHRP**» bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995). Dette ble utført for å si noe om deformasjonsmotstanden for de ulike bitumenprøvene. I tillegg kan man finne en øvre temperaturgrense for når deformasjonskravene blir ugyldig etter kortidsaldring. Samtidig vil utmattingskravet bli kort kommentert for de ulike bitumenprøvene basert på denne standarden.

Fjerde innfallsvinkel vil være å underbygge funnene opp mot tidligere studier som også har sett på effekten av ulike rejuvenatorer på bindemiddelegenskapene i aldret bitumen. Dette er viktig for å vurdere om resultatene sier noe annet sammenlignet med tidligere studier.

Til slutt vil det bli sagt noe om utfordringer og fordeler ved å bruke rejuvenatorer i gjenbruksafalt.

5.1 Bindemiddelresultater og diskusjon før aldringsforsøk

I dette delkapittelet presenteres resultatene for mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og DSR før aldring.

5.1.1 Mykningspunkt før aldring

Tabell 5.1 viser en oversikt over mykningspunktet for de ulike prøvene før aldring. Minimum og maksimums kravet for mykningspunkt for et bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 er mellom 43-51 grader celsius ifølge Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018). Alle prøvene i tabell 5.1 utenom aldret bitumen ligger i det aktuelle krav intervallet. Dette kan skyldes at aldret bitumen har vært gjennom en aldringsprosess og har dermed høyere mykningspunkt (Yousef and Aslam, 2019; Zhang *et al.*, 2020). I tillegg bekreftes det fra tabell 5.1 at nedjustering av rejuvenator-mengden tilsatt i aldret bitumen var viktig for å oppfylle mykningspunkt-kravet for å oppnå en penetrasjonsgrad på 70/100 før aldring (Porot and Bell, 2019). Samtidig har alle rejuvenatorene redusert mykningspunktet i aldret bitumen sammenlignet med prøven som var 100% aldret bitumen i tabell 5.1.

Sammenlignet med referanseprøven på 70/100 bitumen er det rejuvenatoren C som har nærmest mykningspunkt. Dette stemmer også godt med resultater fra en tidligere masteroppgave (Yousef and Aslam, 2019) som testet de samme rejuvenatorene, men at ønsket penetrasjonsgrad for rejuvenator-prøvene var på 160/220. Rejuvenator A hadde det høyeste mykningspunktet av rejuvenatorene, mens Rejuvenator B hadde det laveste mykningspunktet før aldring i tabell 5.1. Dette er litt ulikt fra det som ble funnet fra masteroppgaven (Yousef and Aslam, 2019), hvor Rejuvenator B hadde høyest mykningspunkt mens Rejuvenator A hadde lavest mykningspunkt. Her er det mye variasjoner og feilkilder som kan påvirke rangeringen av mykningspunktet for rejuvenatorene. For eksempel kan menneskelige feilkilder som å tilsette riktig mengder av de ulike rejuvenatorene påvirke mykningspunktet dersom det tilsettes enten mer/mindre av rejuvenatorene.

Tabell 5. 1: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene før aldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	100% av Gjb
Prøvenummer	P1	P2	P3	P4	P5
Mykningspunkt i grader celsius	46,9	48,3	45,9	46,6	55,3
Mykningspunkt-krav for 70/100 bitumen i «N200», kapittel 651.1 før aldring	43-51				

5.1.2 Fraass bruddpunkt før aldring

Tabell 5.2 viser en oversikt over Fraass bruddpunkt for de ulike innblandingene før aldring. Minimumskravet for Fraass bruddpunkt er på -10 grader celsius for et bitumen med penetrasjonsgrad på 70/100 gitt i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018). Alle rejuvenator-prøvene som var tilsatt i aldret bitumen i tabell 5.2 oppfylte dette kravet. Aldret bitumen oppfylte akkurat Fraass bruddpunkt kravet på -10 grader celsius i tabell 5.2 og hadde lavest lavtemperaturoppsprekkings-motstand. Dette skyldes at prøven har vært gjennom en naturlig langtidsaldring sammenlignet med referanseprøven med penetrasjonsgrad på 70/100. Det bekreftes også fra andre undersøkelser hvor ulike rejuvenatorer tilsatt i aldret bitumen forbedret lavtemperatur-oppsprekking motstanden sammenlignet med 100% aldret bitumen (Zaumanis *et al.*, 2014; Yousef and Aslam, 2019; Kraton, 2021).

Det var Rejuvenator C som viste Fraass bruddpunkt nærmest referanseprøven i tabell 5.2. Rejuvenatoren B viste høyest lavtemperaturoppsprekkings-motstand før aldring og deretter kommer Rejuvenator A og Rejuvenator C i tabell 5.2. Generelt sett er Fraass bruddpunktet for rejuvenator-prøvene tilnærmet like som referanse prøven.

Dette er litt ulikt rangering av Fraass bruddpunkt sammenlignet med en tidligere masteroppgave (Yousef and Aslam, 2019). I den masteroppgaven var det Rejuvenator A som viste høyest lavtemperaturoppsprekkings-motstand sammenlignet med referanseprøven med 160/220 bitumen. Denne variasjonen i rangering av Fraass bruddpunkt kan skyldes at testen er brukeravhengig. For eksempel ble det kommentert i masteroppgaven (Yousef and Aslam, 2019) at Fraass bruddpunkt-testen måtte gjentas flere ganger for Rejuvenator A og Rejuvenator B, fordi variasjonen mellom resultatene var for store.

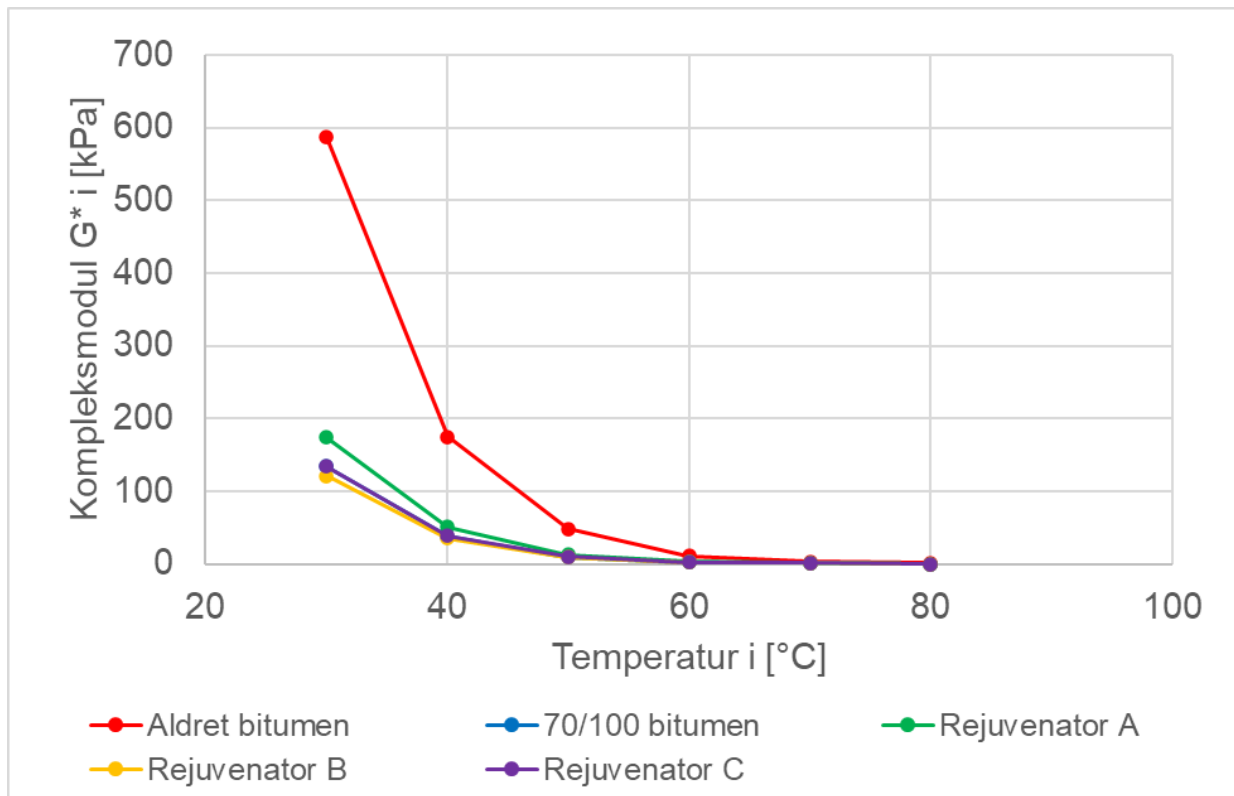
Tabell 5. 2: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene før aldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	100% av Gjb
Prøvenummer	P1	P2	P3	P4	P5
Fraass bruddpunkt i grader celsius	-18,1	-20,2	- 20,5	-18,2	-10,2
Minimumskravet i «N200», kapittel 651.1 før aldring	-10				

5.1.3 Kompleksmodul og fasevinkel før aldring

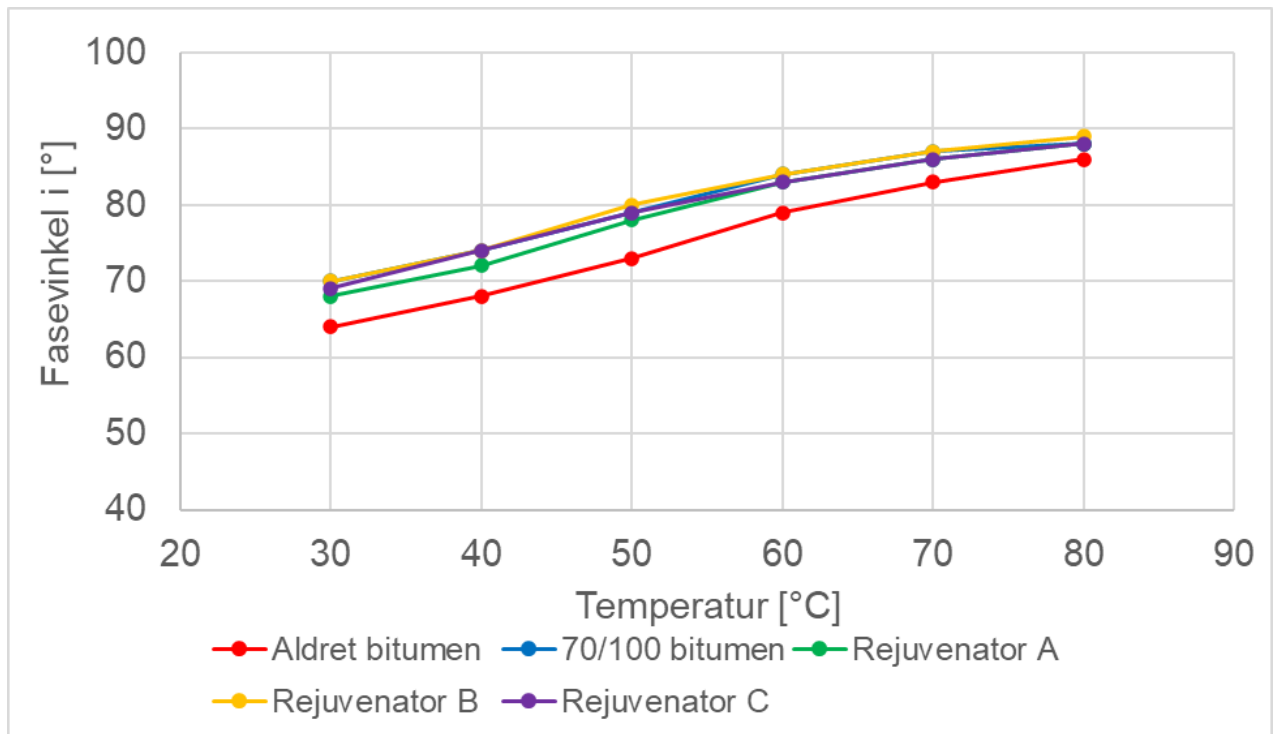
I figur 5.1 er det illustrert utvikling av kompleksmodul med økende temperatur. Når temperaturen øker så vil kompleksmodulen minke, fordi prøvene blir mer flytende og dermed reduseres stivheten (Zhang *et al.*, 2020). Det er som forventet fra figur 5.1 at aldret bitumen har høyest kompleksmodul, fordi den hadde lavest penetrasjonsgrad i tabell 4.4 og har høyest stivhet etter en naturlig langtidsaldring (Zaumanis *et al.*, 2014; Yousef and Aslam, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Deretter følger Rejuvenator A og den ferske bitumen med penetrasjonsgrad 70/100 i figur 5.1. Rejuvenator B og Rejuvenator C hadde lavere kompleksmodul enn den ferske bitumen med penetrasjonsgrad 70/100. Dette kan skyldes at det ble tilsatt litt mer rejuvenator enn hva som var estimert under blanding og vekting, som kan ha ført til en lavere stivhet for disse prøveblandningene og motsatt for Rejuvenator A (Ma *et al.*, 2020). Uansett gir de ulike rejuvenator-prøvene tilnærmet like kompleksverdier som referanseprøven.

For eksempel var det Rejuvenator C som hadde høyest kompleksmodul i en masteroppgave som undersøkt effekten av de samme rejuvenatorene blandet med aldret bitumen (Yousef and Aslam, 2019). Kvaliteten på estimering av rejuvenator-mengdene kan også påvirke kvaliteten på sluttresultatet. Her ville det ha lønt seg å utføre flere penetrasjon og mykningspunkt-tester for Rejuvenatorene B og C tilsatt i aldret bitumen for å finne en bedre gunstig rejuvenator-mengde.



Figur 5. 1: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur før aldring.

Figur 5.2 illustrerer utvikling av fasevinkelen. Generelt sett øker fasevinkel med økende temperatur i figur 5.2 som skyldes at prøvene blir mer flytende når temperaturen øker og stivheten reduseres (Zhang *et al.*, 2020). Samtidig har fasevinkelen økt for de ulike rejuvenator-prøvene tilsatt i aldret bitumen og overlapper rundt referanseprøven. Dette indikerer at rejuvenatorene som er tilsatt i aldret bitumen har klart å gjenopprette de reologiske egenskapene i aldret bitumen (Zhang *et al.*, 2020).

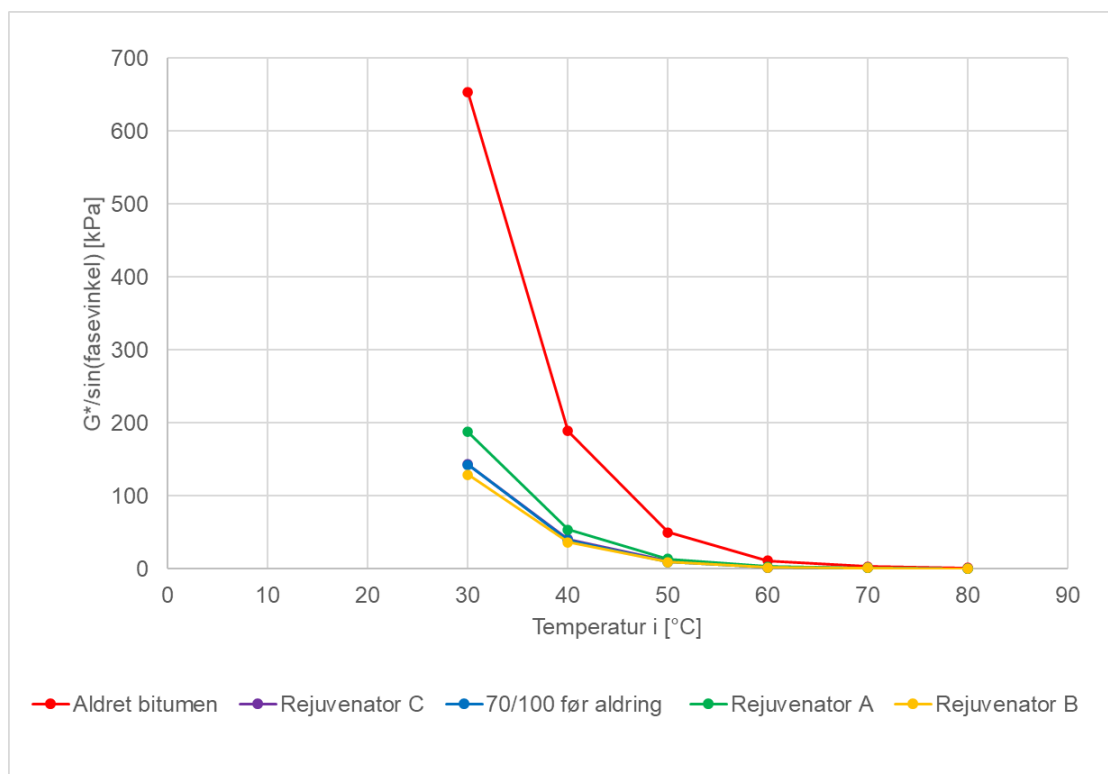


Figur 5. 2: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur før aldring.

Motstand mot permanent deformasjon før aldring

Figur 5.3 viser utvikling av deformasjonsparameteren $G^*/\sin(\text{fasevinkel})$ med økende temperatur før aldring. Det er en generell trend at bindemidlet som har høyest stivhet vil typisk ha størst deformasjonsmotstand (Zaumanis *et al.*, 2014; Elkashef, Williams and Cochran, 2017). Som forventet er det aldret bitumen som har høyest deformasjonsmotstand, fordi den hadde høyest stivhet i figur 5.1. Ved å tilsette de ulike rejuvenatorene i aldret bitumen har stivheten i aldret bitumen blitt redusert betydelig men også deformasjonsmotstanden i figur 5.3 (Zaumanis *et al.*, 2014; Elkashef, Williams and Cochran, 2017; Yousef and Aslam, 2019).

Rejuvenatoren C har veldig lik deformasjonsutvikling som referanseprøven i figur 5.3. I tillegg har denne prøven vist veldig identiske bindemiddelegenskaper ut ifra mykningspunkt og Fraass bruddpunkt-testen som referanseprøven. Rejuvenator A har høyest deformasjonsmotstand og Rejuvenator B har lavest deformasjonsmotstand sammenlignet med de ulike rejuvenatorene. Som nevnt tidligere er det mange parameter som kan ha ført til at deformasjonsmotstand varierer litt mellom de ulike rejuvenator-prøvene. For eksempel feilkilder ved estimering og tilsetning av rejuvenatoren under blanding.



Figur 5. 3: Motstand mot permanentdeformasjon før aldring.

Temperaturgrense basert på «SHRP»- bindemiddelspesifikasjonen før aldring

Tabell 5.3 viser øvre temperaturgrense for de ulike rejuvenator-prøvene i forhold til Performance Graded Asphalt Binder Specifications før aldring i figur 3.2. For å bestemme en temperaturgrense ble kravet $G/\sin(\text{phase angle}) \geq 1,0$ kPa brukt i figur 3.2. Som forventet var det aldret bitumen som hadde høyest temperaturgrense i tabell 5.3, fordi denne prøven hadde både høyest stivhet og mykningspunkt. Alle rejuvenator-prøvene har en øvre temperaturgrense på 64 grader celsius og lik som referanseprøven. Dette bekrefter igjen at rejuvenatorene som ble tilsatt i aldret bitumen har redusert temperaturgrensen for aldret bitumen vesentlig.

Tabell 5. 3: Temperaturgrense basert på «SHRP»-bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) før aldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	100% av Gjb
Kompleksmodul G*[kPa]	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0
Fasevinkel [°]	85,6	85,3	85,3	85,5	85,4
Temperatur i [°C]	77,3	65,0	67,0	65,0	66,0
G/sin(phase angle) \geq 1,0 kPa	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0
PG-Øvre temperatur i [°C]	76	64	64,0	64,0	64,0

5.2 Bindemiddelresultater og diskusjon etter kortidsaldring

I dette delkapittelet presenteres resultatene for mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og DSR etter kortidsaldring.

5.2.1 Mykningspunkt etter kortidsaldring

Tabell 5.4 viser en oversikt over de ulike prøvene som ble testet for i mykningspunkt etter at prøvene ble kortidsaldret. Det var en feilkilde for prøve P9 som kan ha påvirket mykningspunkt resultatet i tabell 5.4. For eksempel fikk prøve P9 tilført 4 % av Rejuvenatoren C i forhold til vekten av aldret bitumen som avviker fra 3 % som var planlagt. Fra tabell 5.4 er det gitt et krav fra Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018) om maksimalt økning av mykningspunkt på 9 grader celsius etter kortidsaldring. Det er bare Rejuvenator C som oppfyller dette kravet, mens resten har mye høyere økning av mykningspunkt. Økning av mykningspunktet for bitumenprøvene kan skyldes at prøvene har blitt kortidsaldret sammenlignet med prøvene før kortidsaldring. Dette bekreftes også av resultater fra en annen studiet (Yousef and Aslam, 2019) som også har sett på de samme rejuvenatorene. På den andre siden oppfylte alle rejuvenatorene i dette studiet økning av mykningspunkt

kravet på 11 grader celsius gitt i Statens vegvesen håndbok «N200» (Statens vegvesen, 2018). En mulig årsak for hvorfor så mange av bitumenprøvene i tabell 5.4 ikke oppfylte økning av mykningspunkt-kravet kan være på grunn av feilkilder under preparering av bitumenprøvene. For eksempel var det en del variasjon i starttemperatur før mykningspunkt-testen og variasjon av avkjølingstid for bitumenprøvene i fryseren. Det er fortsatt Rejuvenator C som har nærmest mykningspunkt i forhold til referanseprøven på 70/100 bitumen etter kortidsaldring. Dette stemmer også godt med resultater fra en annen masteroppgave (Yousef and Aslam, 2019).

Tabell 5. 4: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter kortidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	4 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Prøvenummer	P6	P7	P8	P9
Mykningspunkt i grader celsius	57,9	59,6	61,5	55,6
Økning i mykningspunkt etter kortidsaldring	11	11,3	15,6	9
Krav i «N200», kapittel 651.1, maksimal økning av mykningspunkt for 70/100 bitumen etter kortidsaldring.	9			

5.2.2 Fraass bruddpunkt etter kortidsaldring

Tabell 5.5 viser en oversikt over Fraass bruddpunkt for de ulike innblandingene etter kortidsaldring. Her vil også følgefeilen for prøve P9 kunne påvirke Fraass bruddpunktet i tabell 5.5. Referanseprøven og rejuvenator-prøvene har blitt stivere

og fått redusert Fraass bruddpunktet som også stemmer godt med resultater fra en annen studiet (Zhang *et al.*, 2020).

Det er referanseprøven på 70/100 bitumen som har størst lavtemperaturoppsprekkings-motstand i tabell 5.5 sammenlignet med rejuvenator-prøvene. Dette kan være fordi referanseprøven ikke inneholder noe tilsetning av aldret bitumen som har lav Fraass bruddpunktverdi i tabell 5.2. Deretter følger Rejuvenator A som har et avvik på Fraass bruddpunktverdi lik 0.3 grader celsius i forhold til referanseprøven.

Sammenlignet med en tidligere masteroppgave (Yousef and Aslam, 2019) viste det seg at rejuvenator-prøvene viste bedre lavtemperaturoppsprekkingsmotstand sammenlignet med referanseprøven på 160/220 bitumen etter kortidsaldring. Her er det selvfølgelig forskjeller på fremgangsmåte og menneskelige feilkilder som kan ha preget resultatet. For eksempel ble det nevnt at kortidsaldring ble utført to ganger for samme prøver som avviker fra det jeg har gjort.

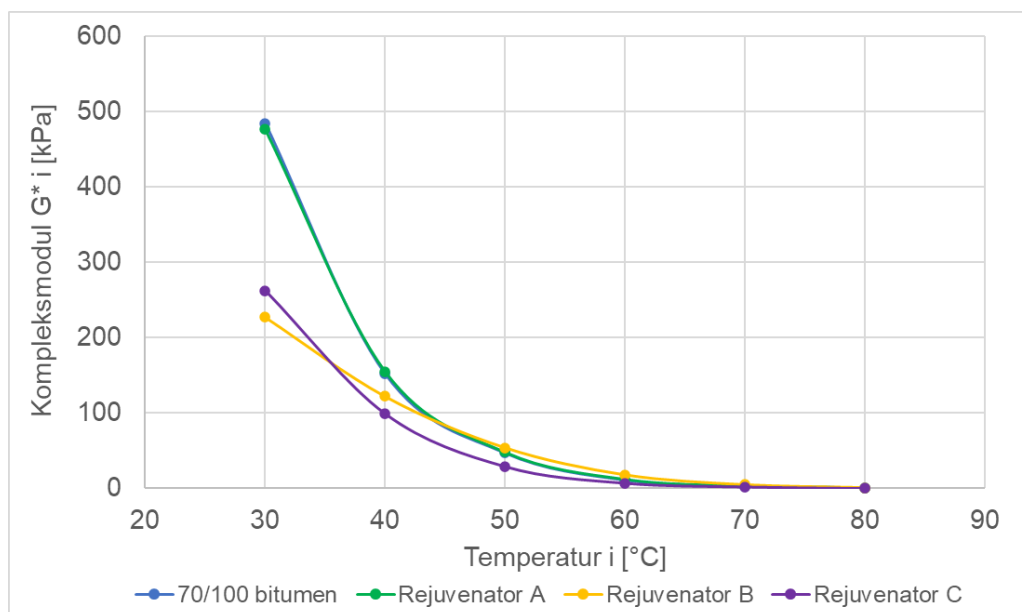
Tabell 5. 5: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter kortidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	4 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Prøvenummer	P6	P7	P8	P9
Fraass bruddpunkt	-17,0	-16,7	-15,1	-15,8

5.2.3 Kompleksmodul og fasevinkel etter kortidsaldring

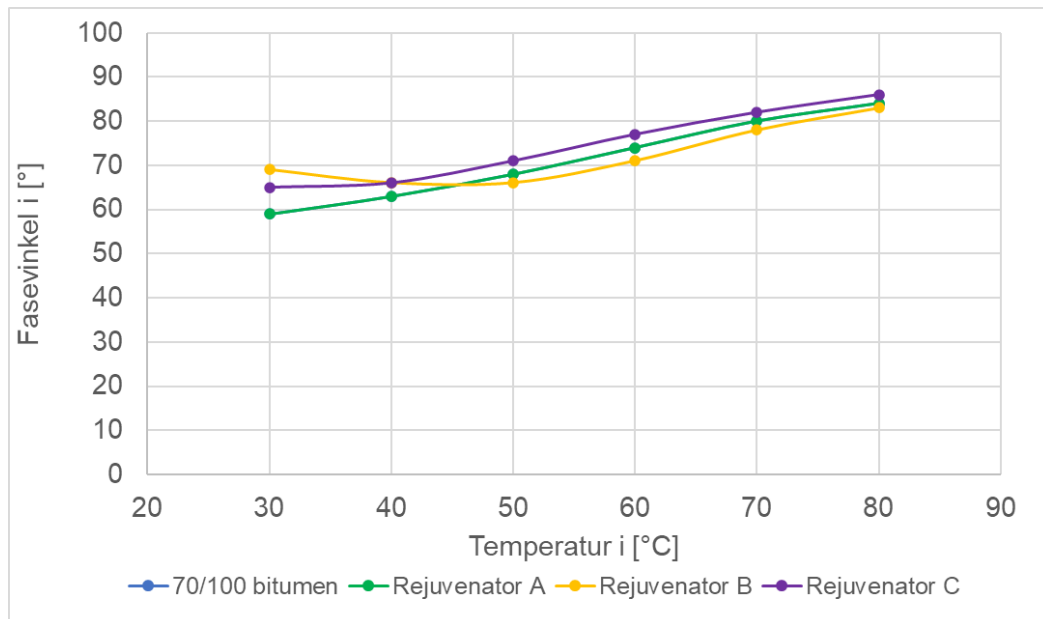
Figur 5.4 illustrere utvikling av kompleksmodulen med økende temperatur etter kortidsaldring. Kompleksmodulen og stivheten har økt for de ulike bitumenprøvene med økende temperatur i figur 5.4 etter kortidsaldring. Dette bekreftes også gjennom

høyere mykningspunkt-verdier som er innenfor lave penetrasjonsgrader fra figur 3.1. I tillegg samsvarer denne utviklingen med en tidligere masteroppgave (Yousef and Aslam, 2019) som også viste økning av stivhet for bitumenprøvene etter kortidsaldring. Rejuvenatoren A har nesten en identisk utvikling av stivhet som referanseprøven 70/100 bitumen. Dette kan tyde på at det var god nøyaktighet ved tilsetning av rejuvenatoren under blandingsprosedyren og god homogenitet i aldrete bitumen. På den andre siden avviker stivheten en del for Rejuvenator B og Rejuvenator C i figur 5.4. Rejuvenatoren C fikk lavere kompleksmodul på grunn av at det ble tilsatt 4 % av rejuvenatoren under blandingsprosedyren i forhold til vekten av aldrete bitumen mens planlagt mengde var på 3 %. Samtidig kan unøyaktig estimering av Rejuvenator B ha ført til at kompleksmodulen ble en del lavere enn referanseprøven. Variasjonen av kompleksmodul etter kortidsaldring er også tydelig fra masteroppgaven (Yousef and Aslam, 2019) som nevnt tidligere. For eksempel var det Rejuvenator C som hadde nærmest lik utvikling av stivhet i forhold til referanseprøven på 160/200 bitumen i det studiet.



Figur 5. 4: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur etter kortidsaldring.

Figur 5.5 illustrerer utviklingen av fasevinkelen med økende temperatur etter kortidsaldring. Rejuvenator B viser en litt merkelig utvikling av fasevinkel i figur 5.5, fordi fasevinkelen går litt ned mens temperaturen øker i figur 5.5. Her ville det ha lønt seg å utføre 2 DSR tester for å sammenligne resultatene og unngå denne feilkilden. Derimot var det begrenset med aldrete bitumen for å gjennomføre flere DSR-tester.



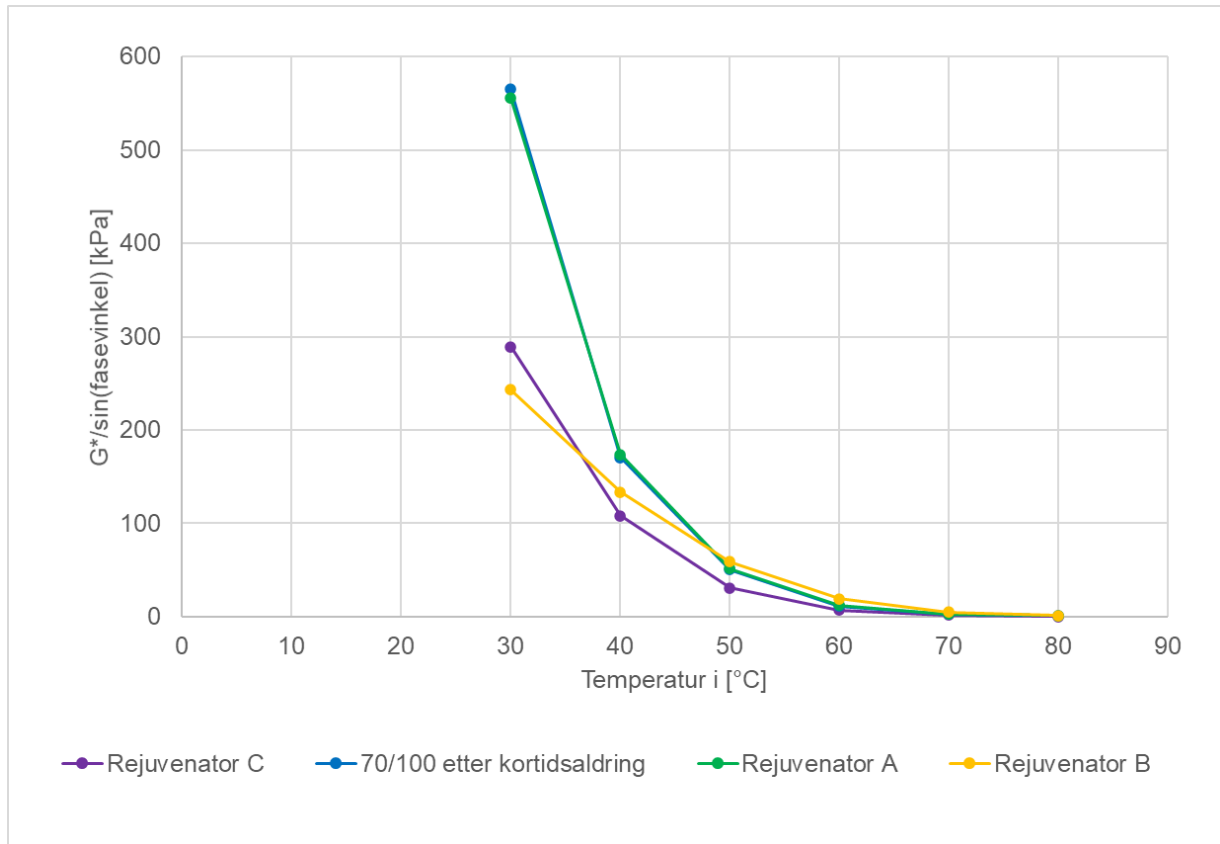
Figur 5. 5: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur etter kortidsaldring.

Motstand mot permanent deformasjon etter kortidsaldring

Figur 5.6 viser utvikling av deformasjonsparameteren $G^*/\sin(\text{fasevinkel})$ med økende temperatur etter kortidsaldring. Det er som forventet at referanseprøven på 70/100 bitumen og Rejuvenator A har høyest deformasjonsmotstand, fordi det hadde størst kompleksmodul og stivhet. Deretter avviker deformasjonsmotstanden en del for Rejuvenator C og Rejuvenator B. Som tidligere nevnt fikk Rejuvenator C tilsatt mer rejuvenator-mengde enn det som var planlagt og dermed har det ført til lavere kompleksmodul og dermed lavere deformasjonsmotstand. I tillegg kan den lave deformasjonsmotstanden i Rejuvenator B tilknyttes feilkilder ved preparering av prøven.

Fra masteroppgaven (Yousef and Aslam, 2019) var det Rejuvenator C som viste mest identisk utvikling av deformasjon-motstand sammenlignet med referanseprøven på 160/220. Dette kan skyldes god estimering av rejuvenator-mengden, fordi det ble utført to penetrasjonstester med ulike rejuvenator-mengder for Rejuvenator C. Dette ble gjort for å finne en gunstig mengde av rejuvenatoren som oppfyller penetrasjonskravet på 160/220. Tilsvarende estimerte jeg rejuvenator-mengden for Rejuvenator A som også viste nesten identisk utvikling av

deformasjonsmostanden som referanseprøven på 70/100 etter kortidsaldring i figur 5.6.



Figur 5. 6: Motstand mot permanent deformasjon etter kortidsaldring.

Temperaturgrense basert på «SHRP»-bindemiddelspesifikasjonen etter kortidsaldring

Tabell 5.6 viser øvre temperaturgrense for de ulike rejuvenator-prøvene i forhold til Performance Graded Asphalt Binder Specifications etter kortidsaldring i figur 3.2. For å bestemme en øvre temperaturgrense ble kravet $G/\sin(\text{phase angle}) \geq 2,2 \text{ kPa}$ brukt i figur 3.2. Samtidig ble temperaturen som oppfyller kravet rundet av til laveste performance grade i figur 3.2, fordi det er mer konservativt og kan gi en sikkerhetsmargin i forhold til å sette en øvre temperaturgrense. Alle rejuvenator-prøvene har en øvre temperaturgrense på 70 grader celsius i tabell 5.6 og som er lik referanseprøven på 70/100 bitumen, utenom Rejuvenator C som fikk tilført mer rejuvenator-mengde enn planlagt.

Tabell 5. 6: Temperaturgrense basert på «SHRP»- bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995) etter kortidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	4 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Kompleksmodul G* [kPa]	2,3	2,3	2,4	2,2
Fasevinkel [°]	80,5	80,8	80,6	81,5
Temperatur i [°C]	72,1	72,2	75,2	68,1
G/sin(fasevinkel) >= 2.2 kPa	2,3	2,4	2,5	2,2
PG-Øvre temperatur i [°C]	70	70,0	70,0	64,0

5.3 Bindemiddelresultater og diskusjon etter langtidsaldring

I dette delkapittelet presenteres resultatene for mykningspunkt, Fraass bruddpunkt og DSR etter langtidsaldring.

5.3.1 Mykningspunkt etter langtidsaldring

Tabell 5.7 viser mykningspunktet for de ulike prøvene etter langtidsaldring. Alle prøvene har økt mykningspunktet, fordi de har blitt langtidsaldret. Det er referanseprøven på 70/100 bitumen som har høyest mykningspunkt. Deretter kommer Rejuvenator C som har nærmest lik mykningspunkt som referanseprøven med et avvik på 0.5 grader celsius. Deretter følger Rejuvenator B og Rejuvenator A. Generelt sett er det ikke store avvik mellom mykningspunktene for de ulike rejuvenatorene som indikerer få feilkilder ved preparering og utførelse av testene.

Tabell 5. 7: Oversikt over mykningspunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter langtidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Prøvenummer	P10	P11	P12	P13
Mykningspunkt i grader celsius	64,3	61,2	63,0	63,8

5.3.2 Fraass bruddpunkt etter langtidsaldring

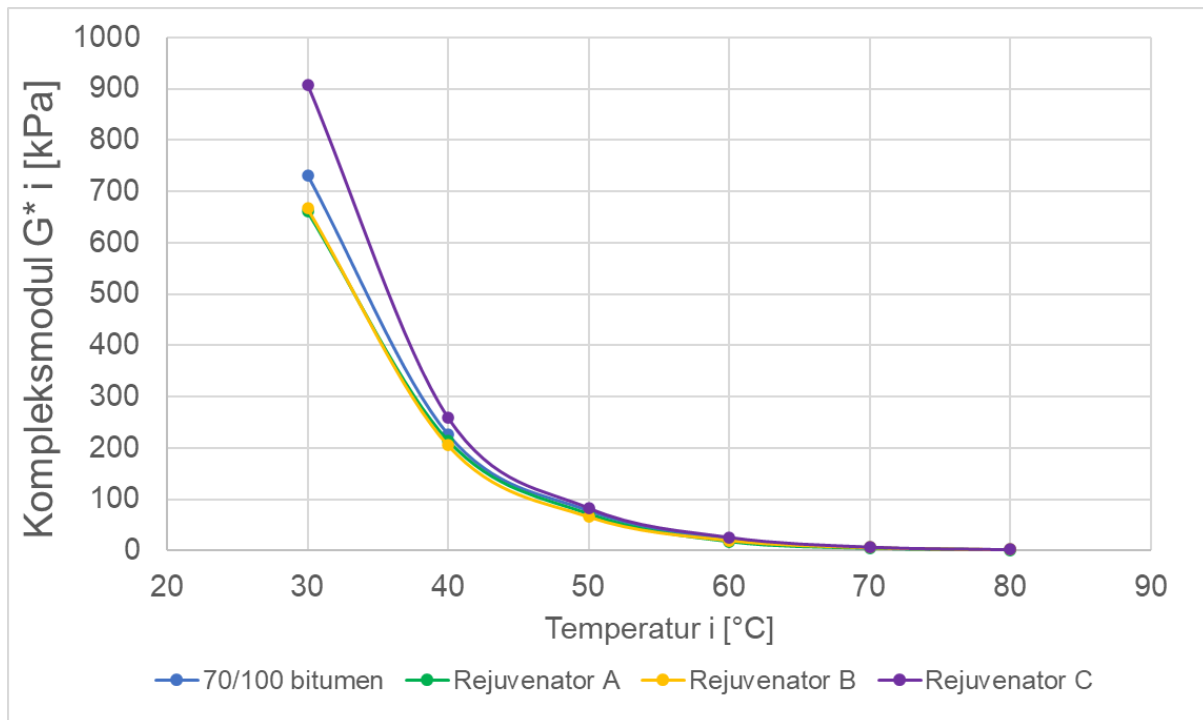
Tabell 5.8 gir en oversikt over Fraass bruddpunkt for de ulike innblandingene etter langtidsaldring. Alle prøvene har blitt stivere gjennom høyere mykningspunkt i tabell 5.7 og dermed har lavtemperatur-oppsprekking motstanden blitt redusert sammenlignet med etter kortidsaldring. I tabell 5.8 er det Rejuvenator A som har høyest lavtemperatur-oppsprekking motstand. Deretter følger Rejuvenator B, referanseprøven på 70/100 bitumen og Rejuvenator C. Det er ikke store forskjeller på lavtemperatur-oppsprekking motstand sammenlignet med referanseprøven. Maksimalt avvik er 1 grader celsius i forhold til referanseprøven i tabell 5.8. Dermed bekreftes det at rejuvenatorene tilsatt i aldret bitumen kan oppnå veldig like lavtemperatur-oppsprekking motstand som referanseprøven på 70/100 bitumen etter langtidsaldring.

Tabell 5. 8: Oversikt over Fraass bruddpunkt for prøvene i de ulike innblandingene etter langtidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Prøvenummer	P10	P11	P12	P13
Fraass bruddpunkt	-12	-13	-12,7	-11,1

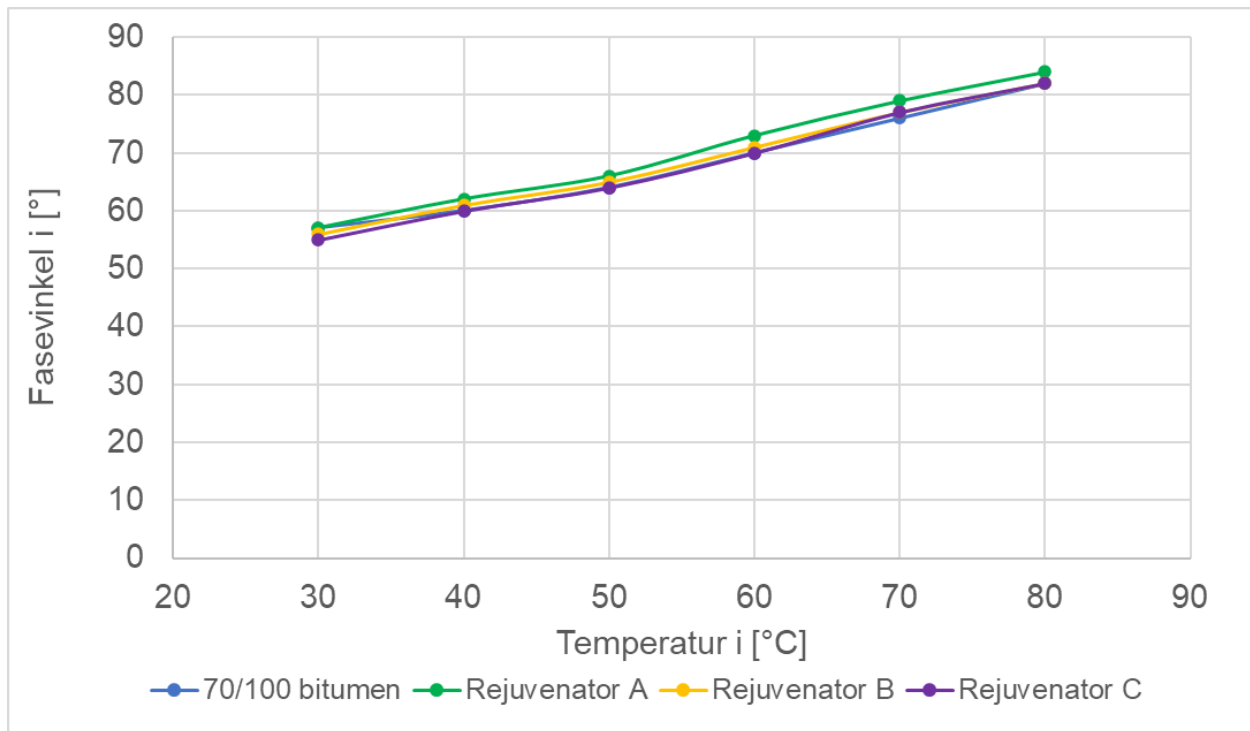
5.3.3 Kompleksmodul og fasevinkel til de ulike prøvene etter langtidsaldring

Figur 5.7 viser utvikling av kompleksmodulen med økende temperatur etter at prøvene har vært gjennom en langtidsaldring. Det er Rejuvenator C som har høyest kompleksmodul sammenlignet med de andre bitumenprøvene. Dette resultatet er litt uforventet, fordi Rejuvenator C hadde lavest mykningspunkt etter langtidsaldring i tabell 5.7 og dermed skulle man forventet at denne prøven hadde lavest stivhet. Dette kan forklares gjennom en tidligere studiet (Andersen, 1995) som begrunner med at de empiriske testene som mykningspunkt ikke nødvendigvis beskriver de fysiske egenskapene godt nok for bitumen-prøvene. På den andre siden kan mindre tilsetning av Rejuvenator C i aldret bitumen ha ført til at stivheten ble så høy. Referanseprøven på 70/100 bitumen har nest høyest kompleksmodul etterfulgt av Rejuvenator B og Rejuvenator A.



Figur 5. 7: Kompleksmodul for de ulike prøvene med økende temperatur etter langtidsaldring.

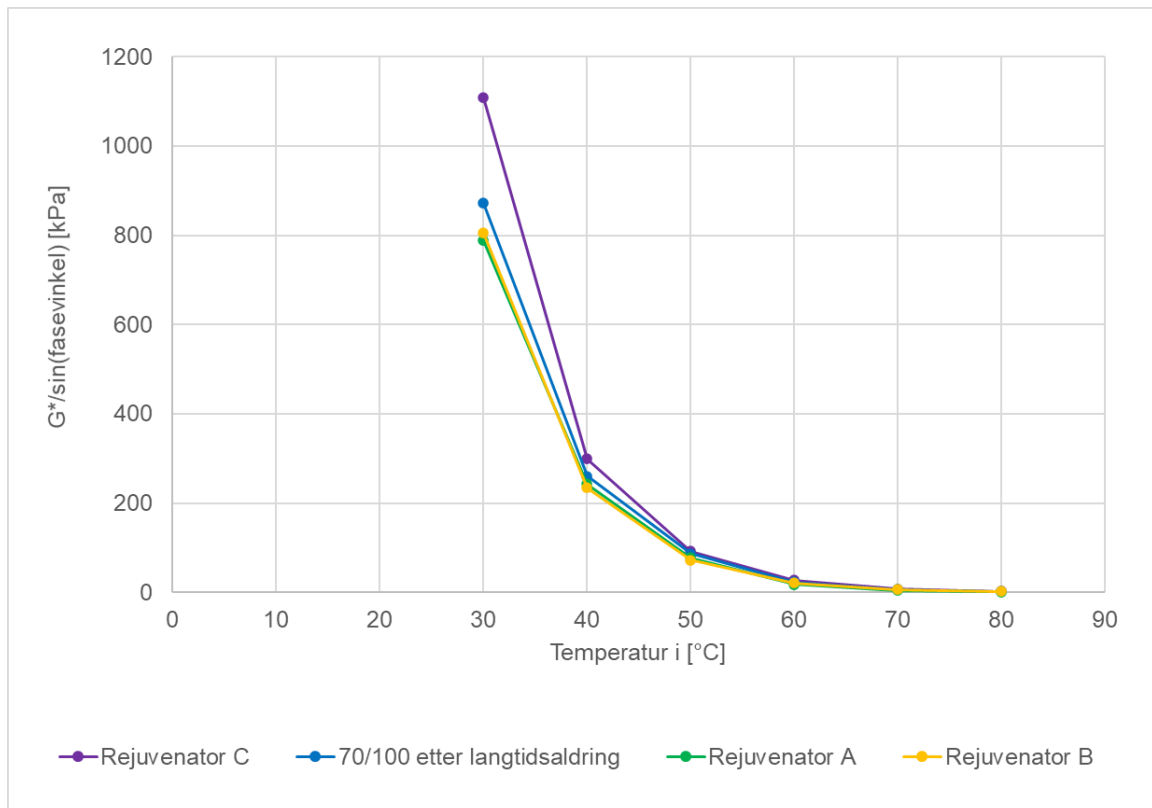
Figur 5.8 viser utvikling av fasevinkelen med økende temperatur for de ulike bitumenprøvene etter langtidslagring. Det er som forventet at Rejuvenator A har høyest fasevinkel med økende temperatur, fordi den hadde lavest stivhet sammenlignet med de andre bitumenprøvene. Deretter følger Rejuvenator B, referanseprøven 70/100 og Rejuvenator C som har lavest utvikling av fasevinkel med økende temperatur.



Figur 5. 8: Fasevinkel for de ulike prøvene med økende temperatur etter langtidsaldring.

5.3.3.1 Motstand mot permanent deformasjon etter langtidsaldring

Figur 5.9 viser utvikling av deformasjonsparameteren $G^*/\sin(\text{fasevinkel})$ med økende temperatur etter langtidsaldring. Deformasjonen er ikke den kritiske parameteren etter langtidsaldring, fordi bindemiddelet har blitt herdet. Derimot er utmatting den mest kritiske parameteren etter langtidsaldring. Det er som forventet at Rejuvenator C har størst deformasjonsmotstand, fordi den hadde størst stivhet. Deretter følger referanseprøven på 70/100, Rejuvenator B og Rejuvenator A. Det er størst avvik i stivhet mellom bitumenprøvene ved starttemperaturen. Deretter utjevner stivheten seg med økende temperatur fram til prøvene blir flytende og viskositeten blir lav.



Figur 5. 9: Motstand mot permanent deformasjon etter langtidsaldring.

5.3.3.2 Utmatting

I figur 3.2 er det gitt en maksimal grense på utmatting lik $G^* \sin(\text{fasevinkel}) \leq 5000$ kPa. Dette er en grense som er satt for å unngå utmattingskader (Andersen, 1995). Basert på tabell 5.9 oppfyller alle bitumenprøvene dette kravet ved starttemperaturen på 30 grader celsius. Den kritiske temperaturen for utmatting vil dermed være lavere enn 30 grader celsius fra tabell 5.9.

Tabell 5. 9: Beregnet utmatting for de ulike bitumenprøvene etter langtidsaldring.

Prøvebeskrivelse	100% av 70/100 bitumen	5 % av Rejuvenator A + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	5.6 % av Rejuvenator B + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen	3 % av Rejuvenator C + 50 % av Gjb+ 50 % av 70/100 bitumen
Kompleksmodul G^* i [kPa] ved 30 grader celsius	731	661	667	908
Fasevinkel i [°]	57	57	56	55
$G^* \sin(\text{fasevinkel}) < 5000$ i [kPa]	872	788	805	1108

5.4 utfordringer med å bruke rejuvenatorer og aldret bitumen i øvre dekkelag på høytrafikkerte veier

Det er viktig å kartlegge noen av utfordringene som kommer med å bruke rejuvenatorer i aldret bitumen dersom det skal anvendes i høytrafikkerte veier. Derfor vil dette delkapitlet gjøre rede for noen av utfordringer tilknyttet oppfylging av krav/dokumentasjon og forenklinger i bindemiddelprøvene i forhold til virkeligheten.

5.4.1 utfordringer med å dokumentere og oppfylle alle kravene

Et av utfordringene med å bruke høye andel gjenbruksasfalt på øvre dekkelag er mengden dokumentasjon som er nødvendig. For eksempel er det gitt krav i Statens vegvesen rapport 670 «**Retningslinjer for asfalt 2019**» (Statens Vegvesen, 2018) for å dokumentere 5 ulike forhold ved å bruke gjenbruksasfalt i slitelag som er høyere enn 10 % ved varm gjenvinning. Samtidig er det gitt bindemiddelkrav i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) i figur 3.1 som også må være oppfylt før gjenbruksasfalt kan brukes. Fordelen med å ha så mange krav er at man kan holde kontroll på kvaliteten av vegen som skal bygges. Samtidig kan man unngå høye drift og vedlikeholdskostnader dersom dekkekvaliteten er dårlig etter utlegging. Et alternativ kunne vært å gå mot mer ytelsesbaserte kriterier fra for

eksempel DSR testen som kan inkorporeres i kontrakten (Hoff, 2020) sammenlignet med å bruke de empiriske testene for dokumentasjon.

I tillegg vil erfaring og nøyaktigheten til personen som utfører alle bindemiddeltestene kunne påvirke resultatet antydnet fra denne masteroppgaven for å oppfylle alle bindemiddelkravene i figur 3.1. Samtidig vil det ta mer tid og høyere kostnader for å gjenta bindemiddeltestene. Et alternativ kunne vært å bruke helautomatisk bindemiddelutstyr for å redusere menneskelige feilkilder, men dette vil koste mer.

5.4.2 Utfordringer med å relatere resultatene i laboratoriet sammenlignet feltforsøk.

Rejuvenatorene oppfyller mange av bindemiddelkravene og har vist gode reologiske bindemiddelegenskaper sammenlignet med en 70/100 bitumen som er angitt i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018). For å være mer sikker på bruken av rejuvenatorer i gjenbruksasfalt kan det utføres feltforsøk og deretter sammenligne bindemiddelegenskapene. Dette er viktig fordi bindemiddelegenskapene ute på felt kan endre seg, fordi temperaturen og trafikklasten ikke er konstant. For eksempel har det blitt gjort undersøkelser ute på felt med høy andel gjenbruksasfalt som har vist at lavtemperatur-oppsprekking er et problem på øvre lag i veien (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016). Dette kan være fordi bindemiddelet i aldret bitumen har for høy stivhet, inhomogenitet i aldret bitumen, feil estimering av rejuvenator mengdene, ulik tilsetning av rejuvenatorene og hurtige endringer av temperatur (Hoff, 2014).

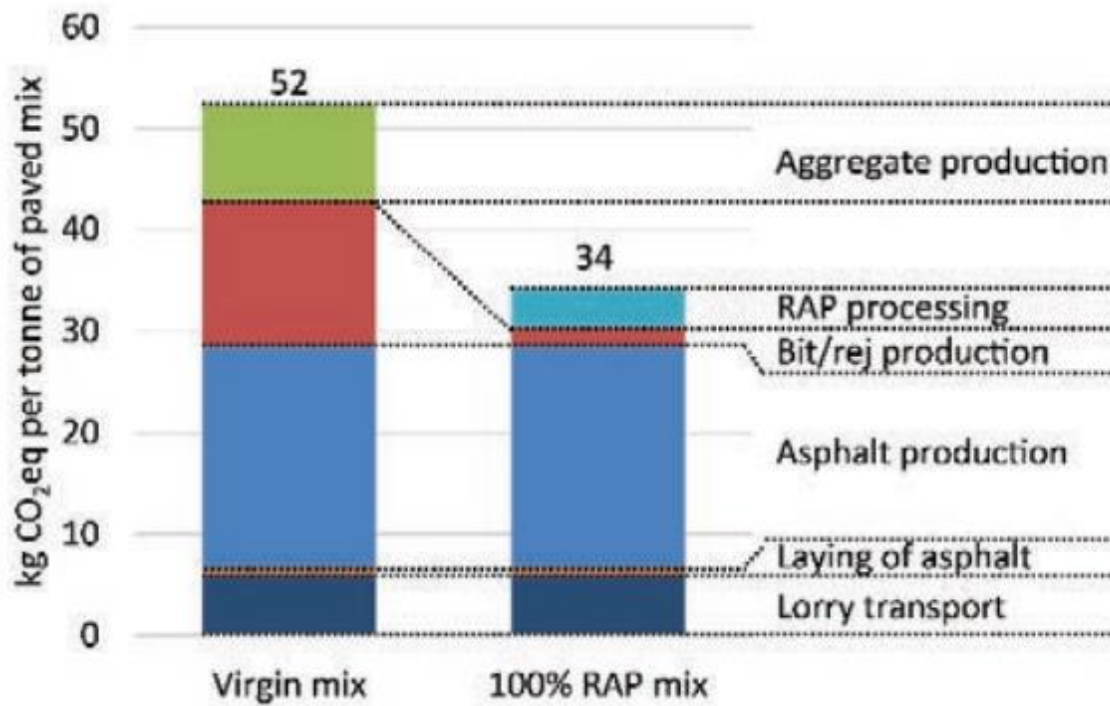
5.5 Fordeler med å bruke rejuvenatorer og aldret bitumen i øvre dekkelag på høytrafikkerte veger

Selv om det er mange utfordringer med å bruke høy andel gjenbruksasfalt i høytrafikkerte veier er det også en del fordeler dersom utfordringene blir løst. I dette delkapitlet blir fordelene tilknyttet miljø og økonomi nærmere diskutert.

5.5.1 Miljøvennlige fordeler med å bruke rejuvenatorer i gjenbruksasfalt

Ved varm behandling av asfalt er det 2 viktige utslippskilder, se i figur 5.10. Dette er karbondioksidutslipp og energiforbruk ved produksjon av bindemiddel og i asfaltproduksjon (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016). Ved å bruke bindemiddel i

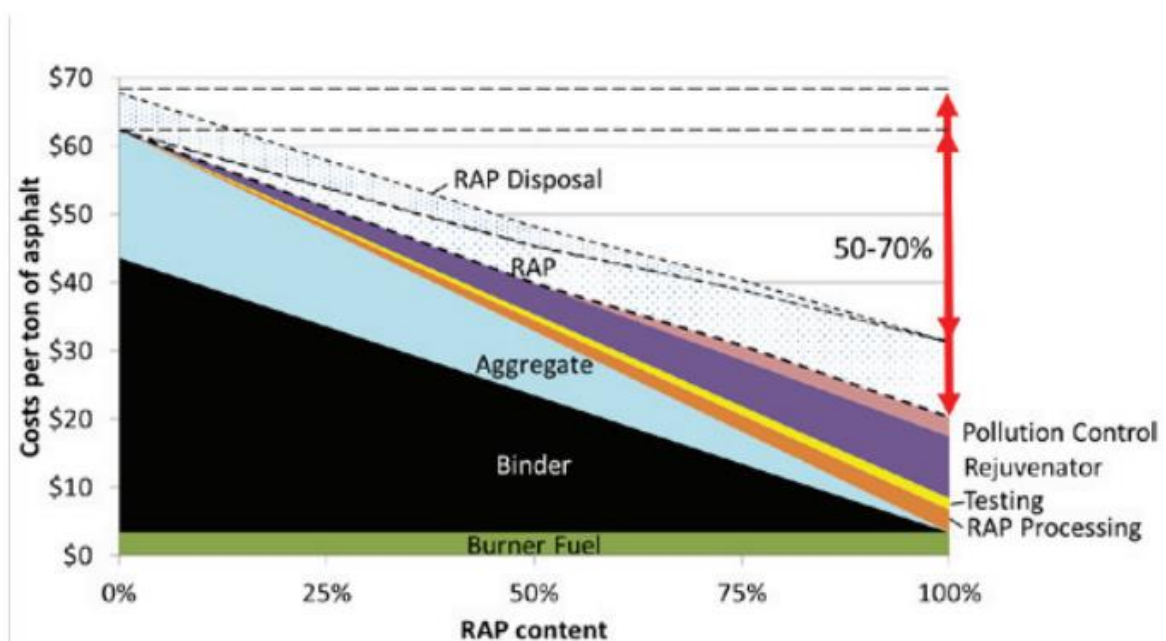
aldret bitumen sammen med rejuvenator kan CO₂ utslipp reduseres sammenlignet med å produsere nytt bindemiddel, noe som vil gi en mer positiv miljøeffekt. Videre vil lokal tilgang av resirkulert asfalt kunne redusere behovet for langtransport av ferskt bitumen som vil også vil bidra til å redusere utslipp av CO₂.



Figur 5. 10: Utslipp per tonn av ferskt og gjenbruksasfalt (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016).

5.5.2 Økonomisk fordeler med å bruke rejuvenatorer i gjenbruksasfalt

Gjenbruksveier inneholder viktige ressurser som steinmaterialet og bindemiddel. Dette er ressurser som kan gjenbrukes. For eksempel ble det i denne masteroppgaven benyttet 50 % av aldret bitumen og 50 % av ferskt 70/100 bitumen. Dette ville ha bidratt til å redusere kostnaden for bindemiddelet med nesten 50 % ut fra figur 5.11, sammenlignet med å bare å bruke 100 % ferskt 70/100 bitumen. I tillegg er det viktig å nevne at prisen for materialene i gjenbruksasfalten vil kunne være lavere for store byer som har mye tilgang på gjenbruksasfalt sammenlignet med små byer som har mindre tilgang (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016).



Figur 5. 11: Materialrelaterte kostnader ved varm behandling i resirkulerte asfalt (Zaumanis, Mallick and Frank, 2016).

Kapittel 6: Konklusjon

Forskningsspørsmålet i denne masteroppgaven var å undersøke effekten av å tilsette tre ulike rejuvenatorer på bindemiddelegenskapene i aldret bitumen og sammenligne det med et referansebitumen på 70/100 gjennom aldringsforsøk. Basert på denne masteroppgaven kan følgende bli konkludert:

- Fra mykningspunkt-testen oppfylte alle blandningene med de undersøkte rejuvenatorene bindemiddelkravet i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) før aldring, men de fleste oppfylte ikke bindemiddelkravet etter kortidsaldring, utenom Rejuvenator C. Sammenlignet med referanseprøven hadde blandningene med rejuvenatorene et lite avvik på mykningspunkt før aldring, men litt større forskjell etter korttids og langtidsaldring.
- Fra lavtemperatur-testen Fraass bruddpunkt oppfylte alle blandningene med rejuvenatorene bindemiddelkravet i Statens vegvesen håndbok «**N200**» (Statens vegvesen, 2018) før aldring. I tillegg viste rejuvenatorene enten bedre eller nesten like gode lavtemperatur-egenskaper sammenlignet med referanseprøven før aldring, etter korttids og etter langtidsaldring.
- Fra deformasjons-testen DSR viste de fleste av blandningene med rejuvenatorene lavere deformasjonsmostand enn referanseprøven før aldring, utenom Rejuvenator A. Etter kortidsaldring visste alle rejuvenatorene lavere deformasjonsmostand enn referanseprøven, mens Rejuvenatoren A var nærmest referanseprøven. Etter langtidsaldring visste de fleste av rejuvenatorene lavere deformasjonsmostand enn referanseprøven, men Rejuvenatoren C viste høyere deformasjonsutvikling i forhold til referanseprøven. Samtidig oppfylte alle prøvene med rejuvenatorene utmattingskriteriet ved temperaturen 30 grader celsius sammenlignet med «**SHRP**» - bindemiddelspesifikasjonen (Andersen, 1995).
- God estimering av rejuvenator-mengden basert på å utføre flere mykningspunkt og penetrasjonsforsøk kan føre til omtrent like bindemiddelegenskaper som referanseprøven.

Samlet viser undersøkelsen at blandningene av rejuvenatorer i aldret bitumen kan gjenopprette tilnærmet de samme bindemiddelegenskaper som et ferskt 70/100 bitumen.

Kapittel 7: Anbefaling for fremtidige undersøkelser

På grunn av kort forskningsperiode var det begrenset med aspekter som ble undersøkt for de tre rejuvenatorene i aldret bitumen. Basert på analysen, resultatene, observasjonen i laboratoriet og erfaringene fra denne oppgaven, kan følgende anbefales for fremtidig forskning innenfor effekten av rejuvenatorer i aldret bindemiddel eller i asfalt:

- Øke andelen av aldret bitumen blandet med ulike rejuvenatorer for å undersøke effekten på bindemiddelegenskapene. For eksempel 80 % aldret bindemiddel blandet med 20 % ferskt bindemiddel av ulike penetrasjonsgrader.
- Undersøke effekten på dekke-egenskaper ved å tilsette rejuvenatorer i asfalt.
- Grave ut biter fra gjenbruksasfalt i eksisterende gjenbruksveger for å undersøke bindemiddelegenskapene.
- Undersøke hvor mange ganger gjenbruksmasser i gjenbruksasfalt kan gjenbrukes.

Bibliografi

Aksnes, J. and Mork, H. (2019) *Enkel empirisk dimensjonering (nivå 1)*, p. 38. Available at: https://drive.google.com/file/d/1C7d4Vth_cplrDYMvj-2MGTOeavP8Mxa7/view?usp=sharing (Accessed: 4 March 2021).

Andersen, E. O. (1995) *En innføring i SHRP-teknologi og terminologi for bindemidler .pdf*. STF61 A95009. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1YfRkkcSHSjHn2hNr9TRdPG4VgxKa6hLF/view?usp=sharing> (Accessed: 20 October 2020).

Andersen, E. O. (1996) *Grunnleggende fysikalske bindemiddelegenskaper*. INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT. Available at: https://drive.google.com/file/d/1yAvlvsdZM4C_VCeLUUV2SLICvcdY_k9s/view?usp=sharing (Accessed: 5 January 2021).

Bakløkk, L. J. (2013) *Deformasjon av asfaltdekker*, p. 32. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1ilvXRu4fRMyp8TezGOe4X7CwfLu07Z0N/view?usp=sharing> (Accessed: 22 March 2021).

Cavalli, M. C. et al. (2017) *Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators | Elsevier Enhanced Reader*. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.060.

EAPA (2018) *RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF REJUVENATORS IN HOT AND WARM ASPHALT PRODUCTION*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1yQq69iAdNCCeUdnzJETYTfAjVsk3v7V/view?usp=sharing> (Accessed: 3 January 2021).

Elkashef, M. and Williams, R. C. (2017) 'Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator', *Construction and Building Materials*, 151, pp. 345–352. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.099.

Elkashef, M., Williams, R. C. and Cochran, E. (2017) *Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures | Elsevier Enhanced Reader*. Available at: https://drive.google.com/file/d/1X8gP-uuBBhltP9DqD0P_-Y1KG8vEQJ9v/view?usp=sharing (Accessed: 11 September 2020).

Hoff, I. (2014) *Low temperature cracking*. IBM. Available at: <https://drive.google.com/file/d/12NRFK1feRLVvNLPzbvIPvzn8fC1jwMmX/view?usp=sharing> (Accessed: 24 February 2021).

Hoff, P. I. (2020) 'Recycling of Asphalt Material', p. 7. Available at: https://drive.google.com/file/d/1bwkNE_FxQOICSymYcOD-8B5FioRvdxz5/view?usp=sharing (Accessed: 15 November 2020).

KFA (2019a) *Årsrapport 2019*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/189exl5p-y0L6AJXOWv8ub6TrDbgVZ8KJ/view?usp=sharing> (Accessed: 20 October 2020).

KFA (2019b) *KFA-Veileder-i-gjenbruk-av-asfalt-2019.pdf*. Available at: <https://www.asfaltgjenvinning.no/resources/files/KFA-Veileder-i-gjenbruk-av-asfalt-2019.pdf> (Accessed: 12 July 2020).

KFA (2019c) *Veileder i gjenbruk av asfalt*. Available at: <https://www.asfaltgjenvinning.no/resources/files/KFA-Veileder-i-gjenbruk-av-asfalt-2019.pdf>.

KFA (2020) *KFA_Blandeprosedyre_for_rejuvenator.pdf*. Available at: https://www.asfaltgjenvinning.no/resources/files/infoskriv/KFA_Blandeprosedyre_for_rejuvenator.pdf (Accessed: 28 September 2020).

Kraton (2021) *SYLVAROAD™ RP1000 Performance Additive Guidelines for Laboratory evaluation*. Kraton. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1Cy7z1DOHPDEtAgWku0CdbSK7-EiPffi4/view?usp=sharing> (Accessed: 1 January 2021).

Ma, Y. et al. (2020) *Rheological and aging characteristics of the recycled asphalt binders with different rejuvenator incorporation methods*, p. 121249. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1IpUaShdCTwiFtT-mkjpaP1tezfcadtnt/view?usp=sharing> (Accessed: 19 February 2021).

Nordahl, R., Andersen, E. and Mork, H. (2018) *Bituminøse bindemidler*. INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT. Available at: https://drive.google.com/file/d/1iPyD5CGFZZO7Qcc_ps4M6QzcnFcXfXR2/view?usp=sharing (Accessed: 5 January 2021).

Nordahl, R. and Mork, H. (2020) *Dimensjoneringsmetodar*. Available at: https://drive.google.com/file/d/14XJFyIvpsdP7KtXK_1S2cfXfWr_gVm03/view?usp=sharing (Accessed: 22 March 2021).

Porot, L. and Bell, D. (2019) *Bringing recycling to the next level using bio-based rejuvenator*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1eL4UKI-7zw5Ze1KsFs5fMldDQYsFxCry/view?usp=sharing>.

Statens vegvesen (2014a) *Håndbok N200 Vegbygging (juni 2014)*. Available at: https://www.vegvesen.no/_attachment/188382/binary/980128?fast_title=Tidligere+utgave%3A+H%C3%A5ndbok+N200+Vegbygging+2014+%2821+MB%29.pdf (Accessed: 22 February 2021).

Statens vegvesen (2014b) 'Laboratorieundersøkelser', p. 431. Available at: https://www.vegvesen.no/_attachment/185231/binary/1090658 (Accessed: 15 October 2020).

Statens vegvesen (2018) 'Håndbok N200 Vegbygging (juli 2018)', p. 308. Available at: https://www.vegvesen.no/_attachment/2364236/binary/1269980 (Accessed: 15 October 2020).

Statens Vegvesen (2018) *Retningslinjer asfalt 2019_SVVrapport_670*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1JoSmn3TJUICreDxWI--Y1jf13YUs3oIn/view?usp=sharing> (Accessed: 24 February 2021).

Utenriksdepartementet (2016) *EØS, Regjeringen.no*. regjeringen.no. Available at: <https://www.regjeringen.no/no/tema/europapolitikk/eos1/id115261/> (Accessed: 29 March 2021).


Yousef, M. and Aslam, O. (2019) *Effekten av rejuvinator på aldret bitumen.pdf*. Byggeteknikk og arkitektur, p. 150. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1WuDnfsuODCEjnJnGkTtKPNPAk7KTWc5Y/view?usp=sharing> (Accessed: 18 November 2020).

Zaumanis, M. *et al.* (2014) *Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures*, pp. 538–550. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1wwZ4LgIgmH6t7KOjBgvC7dbDHrNA6LKm/view?usp=sharing> (Accessed: 4 August 2020).

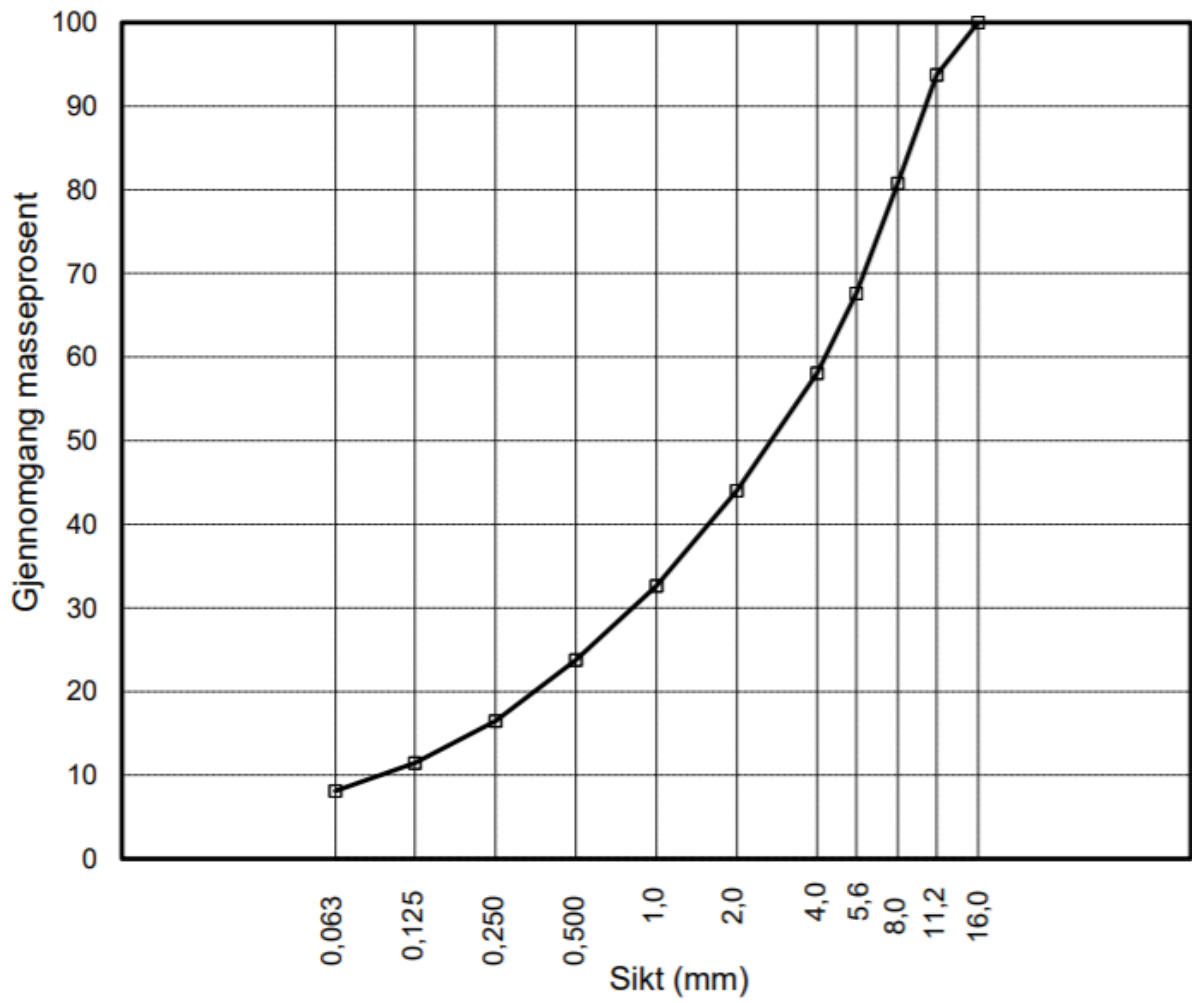
Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. (2016) *100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits | Elsevier Enhanced Reader*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1Cf3HwygSjFsz-HqLyFeeyJlkj23F7aQW/view?usp=sharing> (Accessed: 23 February 2021).

Zhang, J. *et al.* (2020) *Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP*, p. 117755. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1aT6HexawAtcZCNfRiIPk4bKbNtcAQ6ei/view?usp=sharing> (Accessed: 19 February 2021).

Vedlegg 0 – Resultater fra Kompetansesenteret i Veidekke Industri
AS sin ekstraksjon av gjenbruksasfalt.

	EKSTRAKSJON			
	Standard: NS-EN 12697-1 NS-EN 12697-2			
	Dato utført:		09.12.2020	
Utført av:		TD		
Reseptnr	Massetype: Gjenbruk		Temp:	
Dato:	Kl:		Prøvetype:	
Veinr:	Km/side:		HP:	
Sted:				
Analysert for: Student NTNU				
SIKTEANALYSE				
Sikt	Vekt	gj. Prosent	Resept	±
16,0 mm	0,0 g	100,00 %	0,0 %	0,0 %
11,2 mm	203,7 g	93,75 %	0,0 %	0,0 %
8,0 mm	627,3 g	80,74 %	0,0 %	0,0 %
5,6 mm	1054,8 g	67,62 %	0,0 %	0,0 %
4,0 mm	1365,8 g	58,07 %	0,0 %	0,0 %
2,0 mm	1824,3 g	44,00 %	0,0 %	0,0 %
1,0 mm	2194,2 g	32,65 %	0,0 %	0,0 %
0,500 mm	2483,1 g	23,78 %	0,0 %	0,0 %
0,250 mm	2721,2 g	16,47 %	0,0 %	0,0 %
0,125 mm	2884,7 g	11,45 %	0,0 %	0,0 %
0,063 mm	2993,5 g	8,11 %	0,0 %	0,0 %
Bunn	3118,2 g	4,28 %	0,0 %	0,0 %
BINDEMIDDELINNHOOLD				
Ekstr.køye + prøve		6967,1 g		
Ekstaksjonskøye		3469,2 g		
Innveid prøve		3497,9 g		
Ekstrahert + køye		6594,5 g		
Ekstaksjonskøye		3469,2 g		
Steinmateriale		3125,3 g		
Sentrifugesyl. + filler		665,4 g		
Sentrifugesylinder		533,0 g		
Filler		132,4 g		
Sum steinmateriale		3257,7 g		
Bitumen		240,2 g		
Bitumeninnhold		6,87 %		
Bitumeninnhold, resept				

SIKTEKURVE



Mykningspunkt: 56 grader celsius

Penetrasjonsverdi: 39

Vedlegg 1: Resultater fra penetrasjonstesten for alle prøvene

Prøve	Test 1	Test 2	Test 3	Gjennomsnittet
100 % av 70/100 bitumen	91,3	71,9	85,0	85,1
50 % av Gjb +8% av Rejuvenator A	137	113	124	124,7
50 % av Gjb + 5.6 % av Rejuvenator B	71,2	77,4	65,6	71,4
50 % av Gjb +3 % av Rejuvenator C	111	91,7	91,7	98,1
100% av aldret bitumen (Gjb)	41,4	40,1	41,5	41,0

Vedlegg 2: Resultater fra mykningspunkt-testen for alle prøvene

Prøvebeskrivelse	Mykningspunkt i [° C] etter test 1	Mykningspunkt i [° C] etter test 2	Gjennomsnitt av de to testene
P1: 100% av 70/100 bitumen.	46,9	X	46,9
50 % Gjb + 8 % av Rejuvenator A i forhold til vekten av Gjb.	42,2	X	42,2
50 % av Gjb + 5,6 % av Rejuvenator B i forhold til vekten av Gjb.	49,8	X	49,8
50 % av Gjb + 3 % av Rejuvenator C i forhold til vekten av Gjb.	45,3	X	45,3
P2: 50 % av Gjb + 5 % av Rejuvenator A i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen.	48,3	X	48,3
P3: 50 % av Gjb + 5.6 % av Rejuvenator B i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen.	45,9	X	45,9
P4: 50 % Gjb + 3.0 % av Rejuvenator C i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen.	46,6	X	46,6
P5: 100 % av aldret bitumen (Gjb).	55,3	X	55,3
P6: 100% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttidsaldret.	57,9	X	57,9

P7 50 % Gjb + 5 % av Rejuvenator A i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttids aldret.	59,6	X	59,6
P8: 50 % Gjb + 5.6 % av Rejuvenator B i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttids aldret.	61,5	X	61,5
P9: 50 % Gjb + 4 % av Rejuvenator C i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttids aldret.	55,6	X	55,6
P10: 100 % av 70/100 bitumen som er korttids og langtids aldret.	64,2	64,3	64,3
P11: 50 % Gjb + 5 % av Rejuvenator A i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttids og langtidsaldret.	60,9	61,5	61,2
P12: 50 % Gjb + 5.6 % av Rejuvenator B i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven er korttids og langtidsaldret.	63	62,9	63,0
P13: 50 % Gjb + 3 % av Rejuvenator C i forhold til vekten av Gjb+50% av 70/100 bitumen. Denne prøven korttids og langtids aldret.	64,1	63,4	63,8

Vedlegg 3: Resultater fra Fraass bruddpunkt for alle prøvene

 Veidekke Industri AS Kompetansesenteret Besøksadresse: Sluppenveien 19 7037 Trondheim		TESTRAPPORT
		OPPDRAGSGIVER NTNU Inge Hoff Analyser i forbindelse av Tawab Fidai sin hovedoppgave
		RAPPORTNAVN Bestemmelse av Fraas Bruddpunkt og PAV langtidsaldring.
RAPPORTNR. 2021-R-002		OPPDRAGSGIVERS REF. Inge Hoff
MOTTAKSNR. TR 210003		UTFØRT AV (NAVN, SIGN.) Else Marit Småvik
DATO 03.02.2021		GODKJENT AV (NAVN, SIGN.) Bjørn Ove Lurfald 
OPPSUMMERING Kompetansesenteret mottok den 27.01.2021, 13 bitumenprøver fra NTNU ref.Tawab Fidai, prøvene var merket P1–P13. Analyser på disse prøvene var bestemmelse av Fraas Bruddpunkt; NS-EN 12593:2015. På 4 av prøvene P10-13 skulle materialet kjøres først i PAV, Akselerert langtidsaldring med trykkbeholder for aldring; NS-EN 14769:2012.		

Utførte analyser

PAV, Akselerert langtidsaldring med trykkbeholder for aldring på 4 av prøvene.
Fraas Bruddpunkt på alle prøvene.

Standarder og krav

NS-EN 14769:2012 Akselerert langtidsaldring med trykkbeholder for aldring (PAV)
NS-EN 12593:2015 Bestemmelse av Fraas Bruddpunkt

Prøvemateriale

Prøvebokser små merket P1-P9, og en del større merket P10-P13.

Resultater

Prøve ID	Resultat i °C
1	-18,1
2	-20,2
3	-20,5
4	-18,3
5	-10,2
6	-17,0
7	-16,7
8	-15,1
9	-15,8
10	-12,0
11	-13,0
12	-12,7
13	-11,1

Vurdering

Ved langtidsaldring skal formene ifølge NS-EN 14769:2012 fylles med 50 gram bitumen.
Det materialet som var send med var for lite til denne mengden i 2 av prøvene. Det ble
etter avtale fylt 40 ca. gram i hver av formene.

Etter langtidsaldring PAV er det analysert Fraas bruddpunkt, øvrig bindemiddel for videre
analyser utleveres.

Vedlegg 4: Resultater fra DSR for et bitumen på 70/100 i forarbeidet

Data Series Information							
Name:	70/100 test 2 før kortaldring med dato 02.02.2021						
Sample:	20200121-matrix-1						
Operator:	Xuemei						
Number of Intervals:	1						
Application:	RHEOPLUS/32 V3.40 21004559-33024						
Device:	SmartPave301 SN80618713; FW3.40D090210; Slot2; /						
Measuring Date/Time:	2021-02-02; 08:57						
Measuring System:	PP25/PE-SN17073; [d=1 mm]						
Accessories:	TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80620105-80620990						
Calculating Constants:							
- Norm. Csr [min/s]:	1,31018						
- Norm. Css [Pa/mNm]:	325,0669						
- Start Delay Time [s]:	706,703						
- Substance Density [rho]:	1 000						
- Measurement Type:	1						
- Motor Correction Factor:	1						
Interval:	1						
Number of Data Points:	50						
Time Setting:	50 Meas. Pts.						
Measuring Profile:							
#NAME?	Amplitude gamma = 10 %						
	Angular Frequency omega = 10 rad/s						
Temperature	T[-1] = 30 ... 80 °C lin						
Meas. Pts	Time [s]	Angular Fr [rad/s]	Deflection [mrad]	Strain [%]	Complex Mod [kPa]	Phase Ang [°]	Temperat [°C]
1	13,9	10	8	10	134,046	69,9855	30,0058
2	23,4	10	7,96	9,9475	124,556	70,3	31,0098
3	33	10	7,95	9,9291	111,549	70,7058	32,0898
4	42,6	10	7,94	9,9169	99,6025	71,111	33,1361
5	53,4	10	7,95	9,9301	86,636	71,6005	34,2141
6	63	10	7,94	9,9207	76,6551	72,0181	35,2336
7	72,5	10	7,94	9,9224	67,3707	72,4652	36,2653
8	82,1	10	7,95	9,9317	58,5101	72,9568	37,3191
9	91,7	10	7,95	9,936	50,8354	73,4382	38,3464
10	101	10	7,96	9,9459	43,7473	73,9644	39,3921
11	111	10	7,96	9,9509	37,7806	74,4795	40,4167
12	120	10	7,97	9,9591	32,3212	75,0296	41,4621
13	130	10	7,97	9,9625	27,7946	75,5525	42,4825
14	140	10	7,97	9,9608	23,9483	76,0698	43,502
15	149	10	7,97	9,9616	20,4192	76,6192	44,5432
16	159	10	7,97	9,9593	17,5038	77,1537	45,5612
17	168	10	7,97	9,9598	14,8257	77,7298	46,599
18	178	10	7,97	9,9585	12,6314	78,2807	47,6147
19	187	10	7,97	9,9598	10,6697	78,8529	48,6541
20	197	10	7,97	9,9595	9,09916	79,3828	49,6689
21	207	10	7,97	9,9616	7,71887	79,9196	50,7008
22	216	10	7,97	9,9613	6,61168	80,4125	51,7174
23	226	10	7,97	9,9606	5,67064	80,8868	52,736
24	235	10	7,97	9,963	4,84772	81,3642	53,7726
25	245	10	7,97	9,9631	4,17781	81,8021	54,7832
26	254	10	7,97	9,9651	3,58105	82,2417	55,816
27	264	10	7,97	9,9655	3,0999	82,6445	56,8311
28	274	10	7,98	9,9684	2,67223	83,0466	57,8607
29	283	10	7,98	9,9682	2,31952	83,4143	58,8798
30	293	10	7,98	9,9688	2,02124	83,7631	59,8944
31	302	10	7,98	9,9711	1,75115	84,1143	60,9268
32	312	10	7,98	9,9716	1,53174	84,4327	61,9412
33	321	10	7,98	9,9743	1,33238	84,7525	62,9703
34	331	10	7,98	9,9749	1,16943	85,0434	63,9814
35	341	10	7,98	9,9772	1,02048	85,3345	65,0136
36	350	10	7,98	9,9779	0,898093	85,6015	66,029
37	360	10	7,99	9,9804	0,786349	85,8683	67,0554
38	369	10	7,99	9,9808	0,693931	86,1149	68,0734
39	379	10	7,99	9,9812	0,613184	86,3428	69,0894
40	388	10	7,99	9,9834	0,53984	86,5805	70,1205
41	398	10	7,99	9,9842	0,478457	86,7929	71,1341
42	408	10	7,99	9,9859	0,422276	87,0095	72,1584
43	417	10	7,99	9,9868	0,375126	87,21	73,1775
44	427	10	7,99	9,9885	0,332165	87,409	74,2037
45	436	10	7,99	9,9892	0,295826	87,5878	75,2194
46	446	10	7,99	9,9898	0,264039	87,7623	76,2398
47	455	10	8	9,9911	0,234062	87,9434	77,2684
48	465	10	8	9,9918	0,209271	88,106	78,2831
49	475	10	8	9,993	0,186169	88,2662	79,3079
50	484	10	8	9,9936	0,167115	88,4063	80,3245

Vedlegg 5: Ordforklaring

BTDC - Bitumen Test Data Chart er et diagram for å kategorisere temperatur følsomheten for et bitumen ut fra noen bindemiddeltester (Nordahl, Andersen and Mork, 2018) .

DSR - Dynamisk Skjær Reometer er et apparat for å måle de reologiske egenskapene i bitumen (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

EAPA- European Asphalt Pavement Association er en organisasjon i Europa som utgir informasjon og standarder for gjenbruk av asfalt (EAPA, 2018).

EØS- avtalen står for «Den europeiske økonomiske avtalen» og er et hovedfundament i Norges samarbeid med EU. Den sikrer fri bevegelse for personer, varer, tjenester og kapital, og gir norske bedrifter adgang til et marked av 450 millioner mennesker (Utenriksdepartementet, 2016).

Gja – Gjenbruksasfalt som er tilsatt nytt bindemiddel (KFA, 2019b).

Gjb – Gjenvunnet-bitumen fra gjenbruksasfalt (KFA, 2019b).

KFA – Kontrollordning For Asfaltgjenvinning er en frivillig bransjeordning som både fører et miljøregnskap med returafalt og utgir informasjon om gjenbruk av asfalt i Norge (KFA, 2019a).

PAV- Pressure Aging Vessel er et trykkaldringskammer som skal simulere langtidsaldring (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

RTFOT- Rolling Thin Film Oven er en ovn som skal simulerer kortidsaldring (Nordahl, Andersen and Mork, 2018).

SHRP - Strategic Highway Research Program er et forskningsprosjekt for å undersøke noen fysiske egenskaper ved bitumen (Andersen, 1995).