

Optimering af støjreducerende slidlag

Rapport nr. 540



Vejdirektoratet



Optimering af støjreducerende slidlag

Dato:

Maj 2015

Forfattere:

Hans Bendtsen,
Erik Nielsen,
Bent Andersen og
Rasmus Stahlfest Holck Skov

ISBN (NET):

978-87-93184-70-1

Copyright:

Vejdirektoratet, 2015

Indhold

Sammenfatning	4	6. Evaluering af beregningsværktøjet AOT	51
English summary	8	6.1 Præsentation af beregnings- værktøjet AOT	51
Forord	12	6.2 Test af AOT i forhold til støjmålinger	52
1. Indledning	13	6.3 Brug af AOT til beregning af støj fra laboratoriefremstillede test-belægninger	52
2. Europæiske erfaringer med optimeret holdbarhed af tynde slidlag	15	6.4 Samlet vurdering	55
2.1 Schweiz	16	7. Sporkøringsfølsomhed af optimerede tynde slidlag	56
2.2 Frankrig	18	7.1 Baggrund	56
2.3 Holland	19	7.2 Sporkøring (eller permanente deformationer)	56
2.4 Tyskland	20	7.3 Forsøgsplan	58
2.5 Retningslinjer for optimeret holdbarhed	20	7.4 Resultater	60
3. Vurderinger af belægninger meget lille maksimal kornstørrelse	22	7.5 Konklusioner og perspektiv	71
3.1 Støjgenererende mekanismer af betydning for tynde åbne slidlag	23	8. Teksturmålinger på prøveplader	73
3.2 Sammenhæng mellem SPB- og CPX-målinger	25	8.1 Tromleretningens indflydelse på teksturspektre	74
3.3 Resultater fra forsøg på en bygade	26	8.2 Sammenligning med spektre fra veje	74
3.4 Resultater fra forsøg på en hovedlandevej	30	9. Virtuel slibning af belægningsoverflader	77
3.5 Resultater fra slidlag med 4 mm skærver	30	9.1 Fremgangsmåde	77
3.6 Sammenfatning af resultater for slidlag med 4 mm sten	36	9.2 Slibning af belægninger	77
4. Strukturanalyse med tynd- og planslib på støjreducerende tynde slidlag	37	9.3 Resultater af slibningen	82
4.1 Baggrund	37	10. Optimalt valg af bindemiddel i forhold til hærkning	84
4.2 Analyse med tynd- og planslib	38	10.1 Baggrund og formål	84
4.3 Udførte undersøgelser med tynd- og planslib	40	10.2 Forsøgsplan til vurdering af udgangsbitumen og hærdningsforhold	84
4.4 Ekstrakt af konklusioner Kongelundsvej	40	10.3 Databehandling	86
4.5 Ekstrakt af konklusioner Herning II	41	10.4 Diskussion og tolkning af resultaterne	86
4.6 Ekstrakt af konklusioner Stensved	43	10.5 "Tommelfinger"-regler og fortolkninger	90
4.7 Ekstrakt af konklusioner Johs. Jørgensens Vej og Maegyden	43	10.6 Konklusion og perspektiv	94
4.8 Diskussion af tynd- og planslibsundersøgelser	44	11. Opsamling og diskussion	95
4.9 Konklusion på tynd- og planslibsundersøgelser	45	12. Litteratur	99
5. Indkøring og test af nyt udstyr til teksturmålinger	46		
5.1 Baggrund -teksturens indflydelse på dæk/vejbanestøj	46		
5.2 Teksturmåleinstrumenter	48		

Sammenfatning

Denne rapport omhandler optimering af tyndlagsbelægninger. Der har i de senere år i nogle tilfælde vist sig problemer med holdbarheden af nogle støjreducerende tynde slidlag. Disse problemer er bl.a. identificeret som følgende:

1. De støjreducerende slidlag anvender en lille maksimal stenstørrelse, typisk på 6 eller 8 mm, for at reducere dæk/vejbane-støjen. Da belægninger normalt konstrueres med en tykkelse på omkring 3-4 gange den maksimale stenstørrelse, resulterer dette i slidlag med en lille tykkelse på omkring 18 til 24 mm. Slidlag med denne lille tykkelse stiller store krav til jævnheden af det bærelag/binderlag, hvorpå de udlægges. Dette kan bl.a. gøre sig gældende ved udlægning af et tyndt slidlag på en overflader, hvor det gamle slidlag er bortfræset. Hvis underlaget er ujævnt, kan det medføre, at slidlaget i nogle områder får en væsentlig mindre tykkelse end den planlagte og det kan betyde, at slidlaget i et sådant område bliver mindre modstandsdygtigt over for påvirkning fra dæk samt vand og temperaturforhold.
2. De støjreducerende slidlag har en åben overfladestruktur, for at reducere dækvejbanestøjen. Det betyder at bindemidlet i belægningsoverfladen er mere eksponeret for luftens ilt end tættere slidlag. Dette kan fremme en hærdning af den anvendte bitumen, som på sigt kan medføre stentab og nedbrydning af slidlaget.
3. Den åbne overfladestruktur kan betyde, at der dannes små porer i slidlagets samlede tykkelse, hvor der kan trænge vand ned. I vinterperioder med frost kan det føre til en nedbrydning af slidlaget.

Europæiske erfaringer

For at afdække den seneste udvikling på området i Europa blev der i april 2013 foretaget en scanning tur til Tyskland, Schweiz, Frankrig samt Holland. Der er rundt i Europa konstateret reduceret levetid for støjreducerende tynde slidlag. I nogle tilfælde er der opstået skader, bl.a. i løbet af vinterperioden. Dette skyldes ofte en kombination af flere forhold, hvor følgende kan fremhæves:

1. At et tyndt slidlag er blevet udlagt på et ujævnt underlag af dårlig kvalitet.
2. At der ikke var en god membran, som sikrer, at der

ikke trængte vand ned i binderlaget. Den delvist åbne struktur og lille lagtykkelse kan medføre, at vand trænger i gennem slidlaget og ned i binderlaget, hvor der kan forekomme skader i vinterperioden pga. frostsprængninger.

3. At der forekommer drejende/vridende trafik.
4. At udlægning fandt sted forholdsvis sent på året.

Der foregår løbende forsknings- og udviklingsaktiviteter for at udvikle bedre støjreducerende slidlag med optimeret støjreduktion og god fysisk holdbarhed. Der er fokus på at forbedre langtidsstøjdæmpningen og holdbarheden. Akustisk optimering af støjreduktionen for tynde slidlag kan bl.a. foretages ved at anvende:

1. Lille maksimal kornstørrelse typisk 6 eller 8 mm. 4 mm er dog også anvendt med god støjdæmpning.
2. Et stort indbygget hulrum som for tyndlagsbelægninger ligger 8-12 % med halvåbne porer. Hulrum over 18-20 % anvendes dog også, især for belægninger med 4 mm stenmaterialer.

Optimering af holdbarheden for tynde støjreducerende slidlag kan på baggrund af viden indsamlet på studierejsen foretages ved at anvende følgende retningslinjer:

1. Lagtykkelsen skal ikke være under 30 mm.
2. Typisk Marshall-hulrum 8-12 % som halvåbne porer med en åben overfladetekstur.
3. Slidlag kan udvikles i en tykkelse der er væsentligt større end 3-4 gange den maksimale kornstørrelse uden at risikere sporkøring.
4. Slidlaget skal udlægges på nyudlagt underlag (typisk binderlag) eller på et gammelt slidlag i god stand.
5. Fræset overflade er speciel kritisk og skal undgås. Hvis det benyttes, skal det være fintandet fræsning, og ujævnheden fra rillerne på fræset overflade må maksimalt være 3 mm.
6. Underlaget skal have det korrekte profil. Tynde, støjreducerende slidlag kan ikke benyttes til opretning.

7. Der skal anvendes en forholdsvis høj procentdel bindemiddel.
8. Der skal anvendes elastomermodificeret bitumen, som skal være færdigfremstillet (i henhold til DS/EN 14023) og ikke tilvirket "in-situ".
9. Der anvendes ikke genbrug i tynde, støjreducerende slidlag.
10. Slidlag udføres fra 15. april til 15. september.
11. Forseglingsemulsion er nogle gange anvendt, men der er ikke nogen bevist effekt på holdbarheden, men man vurderer dog i Holland en forbedring af levetiden på 1-3 år.
12. God klæbning til underlaget er essentielt samt et jævnt underlag
13. Man skal sikre, at vand fra åbne belægninger ikke trænger ned i underlaget
14. Hvis penge til slidlagsarbejder "frigøres" efter 1. september, bør de anvendes til nye binderlag, hvor nyt slidlag kan udlægges den følgende sommer. Denne strategi er bedre end sent udførte SRS-slidlag
15. Man skal undgå udførelse af håndudlægning
16. Uddannet og erfarent personale på udlæggerholdet, da det kræver speciel erfaring at udlægge et tyndt støjreducerende slidlag
17. Støjreducerende, tynde slidlag skal undgås, hvor der forekommer drejende trafik samt opbremsende/accelererende trafik, i og ved rundkørsler, på kørebaner med forventede stop (betalingsanlæg, busholdepladser etc.) samt på opmarchbåse til trafiklysregulerede kryds etc.

Belægninger med 4 mm stenstørrelse

I forhold til SRS klassificeringen viser støjmålinger på de udvalgte strækninger at slidlagene 4 mm maksimal stenstørrelse i disse tilfælde falder i tre grupper:

- SMA 4 som netop ikke opnåede nogen SRS klassificeringen
- SMA 4+8 som i to tilfælde opnåede en SRS standard klassificeringen
- Et slidlag med 4 mm sten som opnåede en SRS speciel klassificeringen

Spektrale analyser af støjen indikerer, at slidlaget der opnåede SRS speciel klassifikation, som nyt, har en meget jævn overfladetekstur som reducerer den vibrationsgenererede støj. Det har samtidig en meget åben

overfladestruktur, som markant reducerer den luftpumpe-genererede støj, endda så meget, at slidlaget formodentlig har en åben porestruktur i hele slidlagstykkelsen som en drænasfalt-type. Den årlige stigning af støjen ligger på 1,0 dB, hvilket er markant mere end de 0,5 til 0,7 dB/år der normalt observeres for åbne tynde slidlag. Stigning skyldes formodentlig, at den åben porestruktur tilstoppes over de første år af slidlagets levetid samt at belægningsoverfladen bliver mere ru, hvilket bl.a. kan skyldes et begyndende stentab.

Et kig ned i belægningsstrukturen

Støjreducerende egenskaber hænger uløseligt sammen med slidlagets overfladetekstur og luftporestruktur. Disse forhold kan kvalitativt visuelt afdækkes gennem tynd- og planslib, som har været benyttet i gennem mange år til vurdering og erfaringsudvikling af de støjoptimerede, tynde slidlag. Samtidig har teknikken på udførte forsøgs- og demonstrationsstrækninger hjulpet med at fokusere på produktionstekniske forhold og deres indflydelse på den materiale-mæssige sammensætning. Det har betydning for den fysiske holdbarhed af belægningsmaterialer; herunder også kvaliteten af udlægning på underliggende lag.

På tværs af de foretagne undersøgelser igennem årene på forskellige støjreducerende tynde slidlag har teknikken indikeret tre væsentlige forhold:

- Cellulosefibre bruges ofte i mange af disse belægningsmaterialer, og det er essentielt, at asfaltmaterialerne blandes tilstrækkeligt længe til at sikre, at der ikke "efterlades" uomhyllede fiber-klumper, som specielt i de tynde lagtykkelser meget hurtigt kan få negative konsekvenser for den fysiske holdbarhed
- Den støjreducerende overfladetekstur skabes ofte gennem et stenskelet, og tynd- og planslibsteknikken kan vise, hvis der er valgt en uhensigtsmæssig kombination af overdreven vibrationstromling og utilstrækkelig styrke i det anvendte stenmateriale gennem afsløring af knuste flader uden bindemiddel i materialet
- Ved udlægning af de tynde støjreducerende slidlag skal der i særlig grad sættes fokus på anvendelse af stenmel som slipmiddel på lastbilslad, da overdreven eller forkert dosering kan efterlade spor af uomhyllet, fint stenmateriale, der hurtigt har nedsat den fysiske holdbarhed. Her spiller også valg af type af lastbilslad og uddannelse af chaufførerne ind.

Måling af overfladetekstur

Der har været et behov for at kunne måle eller vurdere støjen fra de prøveplader, som produceres i løbet af projektet. Det er her ikke muligt, at anvende de almindelige støjmålemetoder. Der er derfor udviklet en metode til at måle overfladeteksturen på laboratoriefremstillede belægnings-prøveplader. Der er indkøbt en skinne med

en laser med meget høj opløsning, som kan foretage detaljerede overflade-teksturmålinger både på prøveplader i laboratoriet samt på slidlag ude på vejene. Måleudstyret, som kaldes "In-situ-TEX", er blevet afprøvet og indkøbt. Det var planen at bruge tekstur som input data til den hollandsk udviklede beregningsmodel Acoustical Optimaziation Tool (AOT), som på baggrund af målinger af belægnings overfladetekstur skulle kunne beregne det forventede støjniveau for en vejbelægning. Der blev derfor gennemført forskellige test af AOT. Konklusionen er desværre, at AOT ikke er et særlig præcist beregningsværktøj. AOT kan dog bruges til at rangordne belægnings støj mæssigt, men kan ikke beregne støj mæssige forskelle mellem belægnings, som er forholdsvis ens. Derfor vil det i stedet være nødvendigt at vurdere de støj mæssige egenskaber af laboratoriefremstillede belægningsprøver ud fra målinger af belægnings overfladetekstur og analyser af MPD, tekstur spektre mv.

Test af tynde belægnings med større tykkelse

Med ønsket om at opnå en større støjreduktion har udviklingen vist en trend mod mindre og mindre maksimal kornstørrelser i belægnings. Dette har langt hen ad vejen kunnet ske uden tab af friktion og dermed uden at sætte trafik sikkerheden over styr. Der har i de seneste år været et øget fokus på, at varmeindholdet i belægningsmassen kunne sikre den nødvendige komprimering, og at den udlagte lagtykkelse er tilstrækkelig til at kompensere for ujævnheder, der eventuelt kunne stamme fra en tidligere fræsning af underliggende lag. Det har ført til et ønske om større lagtykkelser for disse produkter.

Kombinationen af (relativ) stor lagtykkelse og lille maksimal kornstørrelse har naturligt øget den potentielle risiko for sporkøring i det støj reducerende slidlag. Denne bekymring er i projektet belyst gennem en begrænset undersøgelse af sporkøringens afhængighed af lagtykkelse ved tre udvalgte støj reducerende slidlag. De er afprøvet i lagtykkelser over fire gange maksimal kornstørrelsen, som en gammel tommelfinger-regel foreskriver som den maksimale, anbefalelsesværdige lagtykkelse. Undersøgelsen af de tre slidlag, som er optimeret for sporkøringsresistens i normalt udvalgte lagtykkelser, indikerer ikke forøget risiko for sporkøring ved tykkere lag. Det må pointeres, at der her kun er tale om en meget begrænset stikprøve, og at resultatet ikke nødvendigvis er universelt gældende. Det nævnte emne vil blive forsøgt fulgt op i fremtidige undersøgelser af forudsætninger og gyldighedsområder, da prøvningsmulighederne først blev tilgængelige sent i projektets forløb.

Analysen af overfladetekstur

Der er med måleudstyret in-situ-TEX målt tekstur på prøvepladerne af forskellig tykkelse inden sporkøringsforsøgene er foretaget. Teksturmålingerne kan i høj grad anvendes til, at beskrive om der er tale om belægnings med en "negativ" konkav tekstur, som vil have et lavere støjniveau end en belægning med en "positiv" konveks tekstur. Analyserne viser, at der ikke er nogen tendens til,

at teksturspektrene for prøvepladerne målt enten i eller på tværs af tromleretningen har højere teksturniveauer end den anden retning. Dette indikerer, at tromlingen af prøvepladerne sikrer en jævn og god tekstur.

For to af de tre testede belægnings må det på baggrund af teksturmålingerne og de spektrale analyser vurderes, at tekturen ved pladerne af forskellig tykkelse, men udført af det samme materiale, ikke medfører ændringer af støjniveauerne.

Støj mæssig effekt af slibning af slidlags overflader

Det er i dette projekt valgt som et første forsøg at foretage virtuel slibning i et Matlab-program på tre forskellige belægningsprofiler, hvor der i forvejen forelå teksturdata som muliggjorde denne øvelse. Disse tre belægnings er ikke specielt udvalgt med henblik på, at de ville være særligt egnede til forsøg med slibning. Formålet har derimod været at afprøve den udviklede virtuelle slibningsmetode samt at få nogle første vurderinger af, om der skulle være et potentiale for at opnå støj dæmpning på denne måde. Resultaterne af slibningen viser tydeligvis et potentiale ved at foretage en slibning af belægnings overflade for at skabe en mere negativ overfladetekstur. Det største potentiale vises for en porøelastisk belægnings, som i denne sammenhæng repræsenterer en drænasfalt (en porøs belægning (DA 6)), ligesom den der er blevet slebet på under to fuldskala-forsøg i Sverige og Australien. Dette kan indikere, at det er for porøs samt eventuelt andre belægnings med en åben overfladestruktur, at der er det største potentiale i at foretage en slibning af en belægning i forhold til at opnå en støjreduktion. For både forsøgene i Sverige, Australien og den virtuelle slibning, er potentialet for slibningen op til 2-3 dB støjreduktion.

Optimering af bindemiddel

Til sikring af en lang fysisk holdbarhed af de støj reducerende, tynde slidlag er bindemidlet og dets hærtningsforhold en vigtig parameter. Det er entreprenørens ansvar at vælge det rette (optimale) bindemiddel til asfaltmaterialerne, hvilket ikke mindst er vigtigt for de åbengraderede tynde asfaltslidlag med støj reducerende egenskaber. Til disse vælges derfor ofte in-situ elastomermodificering, men selvom der kan forekomme en beskeden nedbrydning af polymeren, er langtidshærdningen ofte domineret af forhold ved udgangsbitumen. Denne er gerne valgt som en relativ blød bitumen, da polymertil sætning bibringer det samlede bindemiddel den nødvendige stivhed.

Valget af bindemiddel styres (desværre) ofte af tommelfinger-regler, hvis dokumentation er yderst beskeden, og hvor gyldighedsområdet fortaber sig i det ukendte. Da bindemidlet er en holdbarhedsmæssig kritisk parameter, er der i dette projekt lavet et hærtningsstudie i en særskilt rapport. Et uddrag af rapporten er medtaget i dette dokument og konkluderer, at flere af tommelfinger-reglerne i højeste grad skal vurderes kritisk og i det enkelte

tilfælde udfordres, da der ofte er tale om gamle "regler" og ikke naturgivne dogmer.

Undersøgelserne viser også, at de traditionelle bitumenprøvninger, som penetration og blødhedspunkt kugle og ring, kan være utilstrækkelige (for grove) til at vurdere langtidshærdningsforholdene for bindemidlerne. I det virkelige liv besværes disse forhold yderligere af, at polymermodificering af asfalten eller bindemidlet vanskeliggør tolkning med traditionelle prøvninger. Rheologiske målinger med Dynamic Shear Rheometer (DSR) og kemiske analyser som infrarød spektroskopi (IR) er nærliggende prøvninger til at sikre det optimale valg af bindemiddel, både her og nu til produktion og indbygning samt på længere sigt til vurdering af hærdningsforholdene. Disse muligheder vil også blive benyttet ved fremtidige accelererede prøvninger til simulering af langtidsholdbarhed, da trenden i de europæiske bindemiddelspecifikationer vil hjælpe udviklingen på vej i denne retning.

English summary

This report deals with optimized thin pavements. In the recent years some cases have been seen with problems concerning the durability of some noise reducing thin pavements. These problems have been identified as the following:

1. The noise reducing pavements uses a small aggregate size of 6 or 8 mm in order to reduce the noise. Pavements are normally constructed with a layer thickness of 3 to 4 times the maximum aggregate size. This results in very thin layers with a thickness of around 18 to 24 mm.
2. The small thickness of the wearing course gives large requirements to the evenness of the sub layer where on it shall be applied. This is the case where a thin wearing course has to be laid on a surface where the old pavement has been milled off. If the sub layer has an uneven surface structure some areas of the thin layer can get a reduced thickness and this makes it less resistant to the wear and tear from the tyres as well as water and temperature changes.
3. The noise reducing pavements has an open surface texture in order to reduce noise. Therefore the binder in the surface is more exposed to the oxygen of the air than more dense pavements. This can encourage hardening of the bitumen which over time can cause loss of aggregate and deterioration of the pavement layer.
4. Due to the open surface texture small pores can be created in the whole thickness of the layer where water can penetrate. In winter periods with frost this can cause deterioration of the pavement layer.

European experiences

In order to investigate the latest European experiences in this area a scanning tour was conducted in April 2013 to Germany, Switzerland, France and the Netherlands. Reduced lifetime of thin noise reducing pavements has been observed around Europe. In some cases the damages have occurred during winter period. This is caused by a combination series of different reasons where the following can be highlighted:

1. The thin surface layer was paved on an uneven substrate of poor quality

2. Insufficient capability to ensure that water could not penetrate to the binder layer. The partly open structure and the small thickness can lead to water penetration through the surface layer and into the binder layer, where damage can be caused in the winter season due to frost action
3. The traffic exerts turning and shearing forces on the surface layer
4. The thin surface layer was paved fairly late in the year

There are several research and development activities underway which are continuously developing better noise reducing surface layers with optimised noise reduction and good physical durability. The main objectives are to improve the long-term noise reduction and durability. Acoustical optimisation of the noise reduction can, among other means, be achieved using:

1. Small nominal maximum aggregate size (NMAS) – typically 6 or 8 mm as NMAS. Good noise reduction can also be achieved with a NMAS of 4 mm
2. A large built-in void volume, which for thin surface layers is between 8-12 % with half open pores. Voids over 18-20 % are also utilised, especially in pavements with 4 mm aggregates.

Based on the information collected on material and pavement technology the following summary can be drawn up. Optimisation of durability of thin noise reducing surface layers can be achieved based on the following guidelines:

1. The layer thickness should not be less than 30 mm
2. A typical mix design void volume of between 8 and 12 % as half open pores with an open surface texture
3. The surface layer can be developed with a thickness far greater than 3-4 times the nominal maximum aggregates size without risking permanent deformation
4. The surface layer should be placed on a newly paved substrate (typically binder layer) or on an old surface layer in good condition
5. Milling is especially critical and should be avoided. If

used, fine tooth milling should be performed and the unevenness from the milling pattern should be 3 mm maximum

6. The substrate should have the correct profile. Thin noise reducing surface layers cannot be used as levelling course
7. A fairly high binder content should be used
8. Polymer modified bitumen should be readymade (in accordance with DS/EN 14023) and not produced "in-situ" during mixing
9. Reclaimed asphalt is not to be used in thin noise reducing surface layers
10. Surface layers should be paved between 15th April and 15th September
11. Fog seal with bitumen emulsion is sometimes used, without any proof of the effect on durability. However, in The Netherlands the authorities reckon on an improvement in durability of 1 to 3 years
12. Good tack coating to the substrate is essential, as well as an even substrate
13. Ensure that water cannot penetrate to the binder layer through these open structured surface layers
14. If funds for surface layers are available after 1st September they ought to be used for new binder layers, which can be paved with a new thin noise reducing pavement the following summer. This strategy is recommended as being better than paving thin noise reducing pavements late in the year
15. Avoid manual handling of the materials during paving
16. Skilled and experienced paving crews are necessary to obtain optimal quality of thin noise reducing pavements
17. Thin noise reducing surface layers should be avoided where turning, accelerating and braking traffic appears, e.g. in and close to roundabouts, lanes with expected stops (toll booths, bus stops etc.) and approaching traffic lights

Pavements with 4 mm aggregate size

In relation to the Danish SRS noise classification of pavements noise measurements show that pavements with 4 mm aggregate size come out in three groups:

- SMA 4 that did not get an SRS classification
- SMA 4+8 that got a SRS standard classification

- One pavement with 4 mm aggregates got a SRS special classification

Spectral analysis of the noise indicates that the pavement that got a SRS special classification, as new, have an very even surface texture that reduces the noise generated from vibrations in the tyres. At the same time the surface has a very open surface texture, reducing the air pumping noise, indication that it is an open porous surface. The yearly increase in noise is 1.0 dB remarkably over the 0.5 to 0.7 normally seen for thin open pavements. This increase is presumably caused by clogging of the open porous structure in the first years of the lifetime of the pavement and by the surface texture becoming rougher maybe caused by loss of aggregates.

A view inside the pavement layers

The noise reducing properties is linked strongly to the surface texture and air void structure of the surface layer. These relations can qualitatively be assessed visually by thin- and plane sections – a technique which has been used for many years for assessment and development of thin surface layers optimized for noise reduction. In the same period the technique has been used on test and demonstration projects to focus on conditions for the production at the asphalt plant and the influence on material composition. This has had an impact on the physical durability of the pavement materials including the quality of the paving operation on the substrate beneath the new layer.

Across the analysis performed on the different noise reducing thin surface layers throughout the years the technique has indicated three major phenomena:

- Cellulose fibers are used often in many of these pavement materials and it is essential that the asphalt is mixed thoroughly for a sufficient period of time to ensure that lumps are not left behind. Insufficiently coated lumps of cellulose fibers will very quickly have negative consequences on the physical durability; especially in these thin layers.
- The noise reducing surface texture is developed based on the aggregate skeleton of the mix. The thin and plane section technique can demonstrate if an inappropriate combination of overcompaction with vibratory rollers and insufficient strength of the aggregate reveals itself by crushed aggregate faces and cracks without bituminous mortar in the material.
- When paving the thin noise reducing surface layers special attention shall be placed on the use of crushed rock fines as anti-stick measures on lorry beds. Too much or unevenly distributed crushed rock fines for this purposes can leave trails of uncoated fine aggregate particle which can reduce the physical durability very quickly. The choice of type of lorry beds and education of the drivers are key points.

Measurement of surface texture

There has been a need to be able to measure or evaluate the noise from test slabs produced during the project. It is not possible to use normal noise measurement procedures. A method and device has been developed to measure the surface texture of laboratory produced slabs. A laser with high resolution mounted on a rail has been purchased to perform measurements in the laboratory as well as on real roads. The device called "In-situ-TEX" has been tested and run in. It was initially planned to use the Dutch developed Acoustical Optimaziation Tool (AOT) to predict the noise on the background of texture measurements. Different tests using AOT have been performed. The conclusion is unfortunately, that AOT does not seem to be a very precise tool. AOT can be used to rank different pavement types in relation to noise but it cannot be used to predict noise differences between pavements that relative alike. Instead noise performance of test slabs has been evaluated on the background of texture spectra and MPD etc.

Test of thin layers in larger than normal thickness

The quest for obtaining higher noise reduction has developed a trend towards smaller and smaller nominal maximum aggregate size of the surface layer. To a large extent this has been accomplished without loss of friction and endangering traffic safety. In the recent years there has been an increasing focus on the fact, that the heat content of the pavement material shall ensure that the necessary compaction can be achieved as well as the paved layer shall compensate the unevenness that could originate from a milled surface of the substrate. This has led to desire for larger thicknesses of these products.

The combination of (relative) larger layer thickness and small nominal maximum aggregate size has naturally increased the potential risk for permanent deformation in the noise reducing surface layers. This concern has in this project been investigated by a limited study of the dependency of the permanent deformation from layer thickness for three selected noise reducing surface layers. The materials have been tested i layer thicknesses over four times the nominal maximum aggregate size (NMAS) which normally – according to an old rule of thumb – is seen as maximum advisable layer thickness to use. The three materials have been optimized for resistance against permanent deformation in their normal layer thickness and the study indicate that enlarging the layer thickness beyond 4 x NMAS do not show any increased risk of permanent deformation. It must be emphasized that it is a very limited study and the results may not have universal applicability. Future research in this topic may reveal the conditions and limitations of safe operation ranges, but limited time in this project was available for further in depth studies.

Analysis of surface texture

The in-situ-TEX equipment has been used for measuring surface texture on asphalt slab produced in different

thicknesses prior to the use for Wheel Tracking Tests. The measurements of texture can be used to determine whether the pavement materials have a "negative" concave texture or a "positive" convex texture. Analysis of the texture spectra has shown no dependency of orientation when measured along or transversal to the roller path of compaction. This indicate that the laboratory compaction ensure an even and uniform texture.

Based on the texture measurements and the analysis of the texture spectra two of the three pavement materials show no change in noise levels when paved in different layer thicknesses.

Noise effect of grinding of pavement surfaces

A virtual grinding of three pavements has been performed using Matlab software. The purpose has been to test the method for virtual grinding and to get a first evaluation of the noise reducing potential of grinding. The results indicate a potential for creating a more negative surface texture by grinding. The largest potential is shown for a porous pavement like the ones that been grinded in two full scale experiments in Sweden and Australia. This can indicate that the biggest potential for achieving noise reduction by using grinding is for porous pavements and other pavements with an open surface structure. The two full scale experiments in Sweden and Australia as well as the virtual grinding indicate a noise reducing of up to 2 to 3 dB.

Optimal choice of bituminous binder

The bituminous binder and its ageing profile are important parameters for ensuring long physical durability of the noise reducing thin surface layers. It is the responsibility of the contractor to choose the right (optimal) binder for the asphalt materials. This is especially important for the open graded thin asphalt layers with noise reducing capabilities. Often an "in-situ" modification with elastomers is chosen but even though a slight break down of the polymer can occur the long term ageing is often dominated by the base bitumen. This bitumen is likely to be chosen as a relatively soft grade of bitumen as the addition of polymer provides the necessary stiffness of the resulting binder.

The choice of binder is often governed (unfortunately) by rules of thumbs which have limited documentation and where the range of validity disappears into the unknown. As the bituminous binder is a critical parameter for a durability point of view a separate report has been produced on this topic in this project. An extract of that report is given and it concludes that several rules of thumbs shall be assessed very critically thoroughly and in each case challenged as the reality shows often that they are "old" rules and not nature given dogma.

In addition the analysis show that the traditional binder test like penetration and softening point ring and ball can be insufficient measures (too coarse) to assess the long

term ageing behaviour of bituminous binders. In real life these conditions are made even more complicated as polymer modification of the bitumen obstructs interpretations of the traditional tests. Rheological measurements with Dynamic Shear Rheometer (DSR) and chemical analysis like infrared spectroscopy (IR) are likely choices to ensure the optimal selection of binder both up front for production and paving and on longer term for assessment of the ageing behavior. These possibilities will also be utilized in future accelerated studies for simulating long term durability as the trend in European binder specifications will help the development in this direction.

Forord

Denne rapport indeholder resultaterne af et projekt om udvikling og testning af optimerede støjreducerende tynde slidlag, de såkaldte SRS-belægninger. Projektet har fokus på to hovedområder:

- at forøge levetiden på støjreducerende tynde slidlag, samt
- at forøge den støjreducerende virkning over hele belægningernes levetid.

Rapporten er baseret på en række forsøg og målinger, som er gennemført i Danmark suppleret med indsamling af den nyeste internationale europæiske viden. Der er desuden udarbejdet en separat rapport, som sammenfatter resultaterne fra de gennemførte undersøgelser af drænasfalt [40].

Arbejdet er udført som en del af projektet "Optimering af støjreducerende slidlag". Projektet er gennemført inden for rammerne af en pulje til udvikling af nye metoder til støjbekæmpelse i perioden 2009-2014, der er igangsat af Transportministeriet i henhold til "Aftale om en grøn transportpolitik" fra januar 2009.

Projektet er gennemført af en arbejdsgruppe, som i 2014 havde følgende medlemmer fra Vejdirektoratet:

- Hans Bendtsen (projektleder)
- Bent Andersen
- Erik Nielsen
- Erik Olesen
- Bo Wamsler
- Jens Oddershede
- Rasmus Stahlfest Holck Skov
- Claus Krøldrup Pedersen

Til projektet har ligeledes været tilknyttet en følgegruppe med følgende medlemmer fra Vejdirektoratet:

- Bjarne Schmidt
- Peter Andersen
- Freddy Knudsen

Denne projektrapport er skrevet af Hans Bendtsen, Erik Nielsen, Bent Andersen og Rasmus Stahlfest Holck Skov. Vi vil gerne takke alle, der gennem tiden har bidraget i dette projekt, herunder Annette Neidel og Elo Brask med flere fra Vejdirektoratets laboratorium. Uden alle deltagerenes entusiastiske og positive indsats, havde det ikke været muligt at gennemføre dette projekt.

1. Indledning

Projektet "Optimering af støjreducerende slidlag" har som mål at udvikle og teste nye slidlag med optimerede støjreducerende egenskaber og god holdbarhed.

Det er vigtigt at projektet står på skuldrene af den nyeste viden både internationalt samt fra Danmark. I 2009 offentliggjorde Vejdirektoratet (VD) en rapport i SUPSIL-projektet (et samarbejde med det hollandske vejinstitut DVS), som belyste den nyeste internationale viden i forhold til at designe vejbelægninger med et meget stort støjreducerende potentiale [1]. Dette studie viste både, at der er optimeringspotentialer ved anvendelse af tynde slidlag med lille maksimal stenstørrelse og stort indbygget hulrum samt ved anvendelse af drænasfalt i et eller to lag samt ved brug af poroelastiske slidlag. Der er således tre hovedstrategier for udvikling af støjreducerende vejbelægninger:

1. Optimering af tyndlagsbelægninger
2. Optimering af drænasfalt
3. Poroelastiske belægninger, hvor en del af stenmaterialet erstattes med gummi-granulat.

Denne rapport omhandler optimering af tyndlagsbelægninger. Der er udarbejdet en separat rapport om forskellige undersøgelser vedr. drænasfalt [40]. Vejdirektoratet er ligeledes i perioden 2009 til 2015 involveret i det EU-finansierede PERSUADE-projekt [2], som har til formål at udvikle og teste poroelastiske vejbelægninger. Danske resultater fra PERSUADE-projektet kan bl.a. findes i [3].

VD har de sidste 10 år arbejdet meget intensivt med udvikling og test af støjreducerende tynde slidlag og har således oparbejdet stor viden på dette område. De opnåede resultater har bl.a. dannet baggrund for udviklingen af systemet til støjmåssig klassificering af støjreducerende slidlag, det såkaldte SRS-system i november 2006 [4]. På baggrund af de indhøstede erfaringer med brug af SRS-systemet, er der udarbejdet et 2. generationssystem for dokumentation af støjreducerende slidlag som blev offentliggjort i marts 2013 [5].

I ERA-NET-Road-projektet OPTINAL, som VD gennemførte sammen med det Svenske vej og transportforskningsinstitut (VTI) og det Belgiske vejforskningsinstitut (BRRC) i 2007 blev der indsamlet og bearbejdet den nyeste internationale viden om tyndlagsbelægninger [6].

Der er et behov for at arbejde med optimering af belægningernes overfladetekstur med henblik på at opnå en forøget støjreduktion over belægningernes levetid og en forøget strukturel holdbarhed.

Der har i de senere år i nogle tilfælde vist sig problemer med holdbarheden af nogle støjreducerende tynde slidlag. Disse problemer er bl.a. identificeret som følgende:

1. De støjreducerende slidlag anvender en lille maksimal stenstørrelse, typisk på 6 eller 8 mm, for at reducere dæk/vejbane-støjen. Da belægninger normalt konstrueres med en tykkelse på omkring 3-4 gange den maksimale stenstørrelse resulterer dette i slidlag med en lille tykkelse på omkring 18 til 24 mm. Slidlag med denne lille tykkelse stiller store krav til jævnheden af det bærelag/binderlag, hvorpå de udlægges. Dette kan bl.a. gøre sig gældende ved udlægning af et tyndt slidlag på en overflade, hvor det gamle slidlag er bortfræset. Hvis underlaget er ujævnt, kan det medføre at slidlaget i nogle områder får en væsentlig mindre tykkelse end den planlagte – og det kan betyde, at slidlaget i et sådant område bliver mindre modstandsdygtigt over for påvirkning fra dæk samt vand- og temperaturforhold.
2. De støjreducerende slidlag har en åben overfladestruktur, for at reducere dæk/vejbane-støjen. Det betyder at bindemidlet i belægningsoverfladen er mere eksponeret for luftens ilt end tættere slidlag. Dette kan fremme en hærdning af den anvendte bitumen, som på sigt kan medføre stentab og nedbrydning af slidlaget.
3. Den åbne overfladestruktur kan betyde at der dannes små porer i slidlagets samlede tykkelse, hvor der kan trænge vand ned. I vinterperioder med frost kan det føre til en nedbrydning af slidlaget.

For at afdække den seneste udvikling på området i Europa blev der i april 2013 foretaget en scanning-tur til Tyskland, Schweiz, Frankrig samt Holland. Denne studietur er afrapporteret i en selvstændig rapport [14] og hovedresultaterne præsenteres i kapitel 2.

For at belyse potentialet for brug af belægninger med meget lille maksimal stenstørrelse er der gennemført analyser og vurderinger af en række støjmålinger udført på slidlag med en maksimal stenstørrelse på 4 mm. Dette

præsenteres i kapitel 3.

Ovenstående problemstillinger understreger behovet for at arbejde med at udvikle støjreducerende slidlagstyper med forøget holdbarhed. Hovedvægten i dette projekt er lagt på at anvende laboratoriebaserede forsøg og analysemetoder frem for på dette stade at gennemføre fuldskala-forsøg. Der er derfor lagt vægt på at udvikle og anskaffe relevant nyt udstyr samt at tilpasse eksisterende metoder som muliggør denne laboratoriebaserede angrebsvinkel. Der er bl.a. anskaffet et Hamborg indtromlings- og testudstyr [41], som gør det muligt i laboratoriet at producere plader af optimerede og lovende belægningstype. Projektets resultater vil evt. på et senere tidspunkt kunne ligge til grund for etablering af fuldskala-forsøg og demonstrationsstrækninger, men det ligger uden for dette projekts rammer.

I projektet undersøges det, om det er muligt at konstruere tynde støjreducerende slidlag med en forøget tykkelse, således at slidlaget bedre kan optage ujævnheder i underlaget uden at få holdbarheden reduceret og samtidig med at de støjreducerende egenskaber bibeholdes. Dette udføres med en serie forsøg med forskellige slidlag i laboratoriet ved anvendelse af Vejdirektoratets nye Hamborg testudstyr til accelereret testning af resistens mod sporkøring mv. (kapitel 7).

Problematikken med hærkning af bindemidlet på de åbne overflader belyses gennem en række forsøg i laboratoriet med accelereret testning af bitumen med forskellig hårdhed (kapitel 10).

Den åbne overfladestrukturens betydning for eventuel vandnedtrængning belyses gennem en serie tynd og planslib-analyser af borekerner fra forskellige forsøgsstrækninger med støjreducerende tynde slidlag. Formålet har været at belyse og vurdere belægningsens fysiske struktur og forventede holdbarhed mv. Dette præsenteres i kapitel 4.

Der er i dette projekt et behov for at kunne måle eller vurdere støjen fra de prøveplader som produceres i løbet af projektet. Det er ikke muligt at anvende de almindelige støjmålemetoder til måling af støj fra laboratoriefremstillede prøveplader. Både metoden med støjtrailerens deciBella (CPX) samt metoden (SPB), hvor støjen måles i vejsiden på et større antal køretøjer, kræver etablering af en fuldskala-forsøgsbelægning på en vejstrækning. Det er grundlæggende et slidlags overfladetekstur, som er bestemmende for den dæk/vejbane-støj, som genereres af biltrafikken. Der er derfor arbejdet på at udvikle en metode, der kan anvendes til at måle overfladeteksturen på laboratoriefremstillede belægningsprøveplader. Til dette er der indkøbt en skinne med en laser med meget høj opløsning, som kan foretage detaljerede overfladeteksturmålinger både på prøveplader i laboratoriet samt på slidlag ude på vejene. Måleudstyret som kaldes "In-situ-TEX" er blevet afprøvet og indkøbt. Dette præsenteres i kapitel 5.

Det var planen at bruge tekstur som input data til den hollandsk udviklede beregningsmodel Acoustical Optimization Tool (AOT), som på baggrund af målinger af belægningsens overfladetekstur skulle kunne beregne det forventede støjniveau for en vejbelægning. Der blev derfor gennemført forskellige test af AOT. Disse undersøgelser præsenteres i kapitel 6. Konklusionen er desværre, at AOT ikke er et særlig præcist beregningsværktøj. AOT kan dog bruges til at rangordne belægningsstøjmålsigt, men kan ikke beregne støjmålsige forskelle mellem belægningsarter som er forholdsvis ens. Derfor vil det i stedet være nødvendigt at vurdere de støjmålsige egenskaber af laboratoriefremstillede belægningsprøver ud fra målinger af belægningsens overfladetekstur og analyser af MPD, tekstur spektre mv. Måling af lydabsorption på borekerner vil kunne anvendes.

Vurderingen af støjen fra de laboratoriefremstillede prøveplader præsenteres i kapitel 8 på baggrund af de gennemførte teksturmålinger med In-situ-TEX udstyret.

For at opnå en stor støjreduktion anvendes i nogle tilfælde tynde slidlag med en meget åben overfladestruktur samt en lille maksimal stenstørrelse da dette samtidig skulle sikre en meget jævn overfladetekstur. For at belyse og vurdere potentialet for sådanne belægningsarter præsenteres nogle måleresultater i kapitel 3.

En måde at reducere støjen kunne være at forøge belægningsens "fine" jævnhed ved at slibe belægningsoverfladen. For at vurdere det mulige støjmålsige potentiale ved dette, er der gennemført nogle simuleringer og beregninger af effekten af dette, som præsenteres i kapitel 9.

Afslutningsvis skal det bemærkes, at Vejdirektoratet i 2012 offentliggjorde en rapport om beboerne langs vejes opfattelse af støjen før og efter udlægning af støjreducerende tynde slidlag [15]. I to områder i København er der udlagt støjreducerende asfalt på de primære veje. Før og efter udlægningen blev der foretaget spørgeskemaundersøgelser af beboernes oplevede støjgener. De væsentligste konklusioner er:

- Det giver en statistisk signifikant reduktion af støjgenerne at udlægge støjreducerende asfalt
- Selv om trafikstøjen stadig er den største gene ved trafikken i de to undersøgte områder, er andelen af kraftigt og ekstremt generede personer væsentligt reduceret med den støjdæmpende asfalt
- Generelt er ca. 10 % færre generede af vejtrafikstøjen i eftersituationen, og 7 % flere synes, at støjniveauet fra vejtrafik ved deres bolig er acceptabelt

Denne undersøgelses resultater understreger, at arbejdet med udvikling og brug af støjreducerende slidlag vil have en positiv effekt for vejenes naboer.

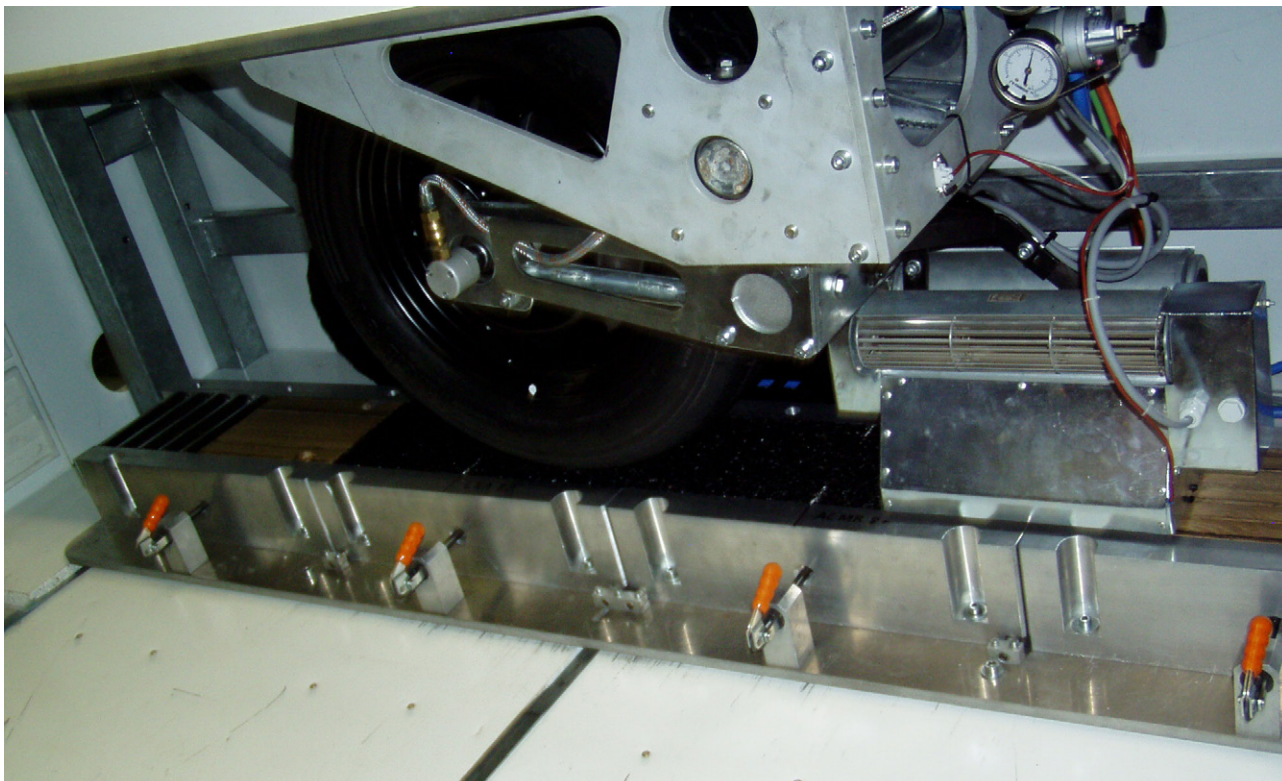
2. Europæiske erfaringer med optimeret holdbarhed af tynde slidlag

Det er vigtigt, at projektet står på skuldrene af den nyeste internationale viden. For at afdække den seneste udvikling og erfaring inden for området støjreducerende tynde slidlag i Europa blev der i april 2013 foretaget en scanning tur til Schweiz, Frankrig, Holland samt Tyskland. Disse fire lande blev udvalgt, da det blev vurderet, at der fandtes relevant erfaring og ny viden inden for området tynde støjreducerende slidlag. Formålet med studierejsen var at få ny viden både om fysisk holdbarhed samt akustisk virkning af støjreducerende tynde slidlag. Da formålet var tværfagligt omfattede delegationen fra Vejdirektoratet medarbejdere med speciale i henholdsvis støj samt det belægningstekniske område. Der blev afholdt møder med eksperter hos forskningsinstitutioner, vejmyndigheder, rådgivende virksomheder og laboratorier:

- I Schweiz det rådgivende akustik firma Grolimund + Partner AG samt IMP Bautech AG, Institut for materialetestning, byggerådgivning og analyse.
- I Frankrig forskningsinstitutionen IFSTTAR, som bl.a. arbejder med forskning og udvikling inden for vej- og broområdet.
- I Holland det hollandske vej- og vanddirektorat (Rijkswaterstaat).
- I Tyskland det tyske vejforskningsinstitut BAST.



Figur 2.1:
Scanning turens rute gennem Europa i april 2013.



Figur 2.2:

Udstyr der anvendes til at undersøge de teksturændringer, som et personbildæk af normal størrelse og med et vist slip udfører, når det køres frem og tilbage på flere belægningsprøver, der er lagt i forlængelse af hinanden.

Denne scanning tur er afrapporteret i den selvstændige rapport "Europæiske erfaringer med tynde støjreducerende asfaltslidlag" [14]. Hovedresultaterne præsenteres i dette kapitel. Først gennemgås kort erfaringerne fra de enkelte lande (afsnit 2.1 til 2.4) og afslutningsvis præsenteres en sammenfatning på tværs (afsnit 2.5) med fokus på optimering af slidlagenes holdbarhed. Indholdet afspejler den viden og de faglige vurderinger, som de interviewede eksperter fremlagde under møderne, såvel som den måde forfatterne forstod disse informationer på. Det kan således ikke udelukkes, at der i enkelte tilfælde kan optræde unøjagtigheder i forhold til den faktiske situation i de fire lande.

2.1 Schweiz

Politik for brug af tyndlagsbelægninger:

- Stort fokus på støj fra vejtrafik og overholdelse af grænseværdier og derfor anvendes ofte støjreducerende slidlag.
- På statsvejnettet anvendes ofte støjreducerende slidlag af Schweizisk type (ligner åben SMA).
- På bygader anvendes i nogle tilfælde støjreducerende meget åbne slidlag med 4 mm sten på trods af forholdsvis kort levetid (6-8 år).

Belægningstyper som anvendes:

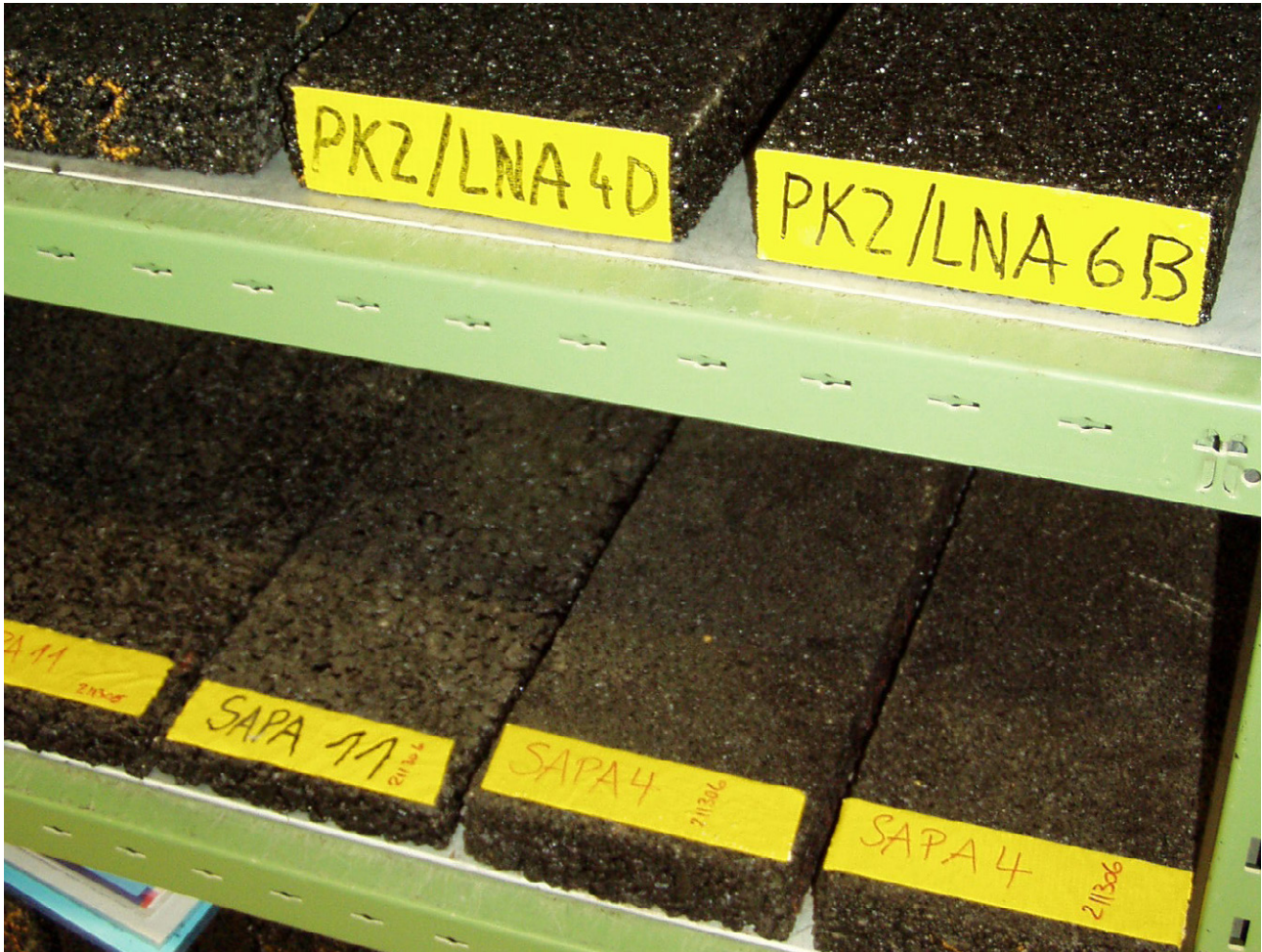
- SMA med 4 eller 8 mm sten og indbygget hulrum 8-12 %.
- Meget åbne asfaltbetontyper med kornstørrelse 4 mm, stort indbygget hulrum på 20 % og lagtykkelse på 30-40 mm.

Støjreduktion vurderet i forhold til et nyt AB 11t slidlag:

- Ca. 3,5 dB støjdæmpning på optimeret åben SMA med 8 mm sten.
- Ca. 6 dB støjreduktion på belægninger med 4 mm sten og 20 % hulrum.

Vigtige forhold ved udlægning af tyndlagsbelægninger:

- Skal udlægges på godt, jævnt og tæt bærelag.
- Støjreducerende slidlag undgås på steder som:
 - Rundkørsler,
 - Kørebaner med forventede stop (betalingsanlæg, busholdepladser etc.),



Figur 2.3:
Prøver fra forskellige støjreducerende slidlag som testes i laboratoriet.



Figur 2.4:
Der anvendes betonbelægninger i nogle rundkørsler i Zürich- området, da denne belægningstype er meget modstandsdygtig over for drejende trafik.

- Opmarchbåse til lysregulerede kryds.

Fysisk holdbarhed:

- SMA 8 mm 15-20 år.
- Åben belægning med 4 mm sten vurderes til 6-8 år.
- Med hensyn til vedligeholdelse er det en generel politik, at nye slidlag bør holde i 15 år, hvilket der også dimensioneres efter i forhold til bæreevne.

Øvrige kommentarer:

- Kortere fysisk levetid accepteres fx af vejmyndighederne i Geneve for at opnå støjreduktion.
- Bemærkelsesværdigt, at slidlag med kun 4 mm sten udlægges i tykkelse på op til 40 mm.

2.2 Frankrig

Politik for brug af tyndlagsbelægninger:

- Stor offentlig opmærksomhed på støjgener, og generelt et stort offentligt pres på vejmyndighederne for at få reduceret støjen.
- Ved nye vejprojekter anvendes støjreducerende slidlag ofte i kombination med andre virkemidler, som støjafskærmning og facade isolering.

Belægningstyper som anvendes:

- På motorvejene er 50 % af slidlagene i dag tynde, støjreducerende typer, typisk med en maksimal kornstørrelse på mellem 6-10 mm sten samt 20-30 mm tykkelse.
- På bygader anvendes støjreducerende, tynde slidlag med ned til 4 mm sten og op til 20 % hulrum og 30-40 mm tykkelse.

Støjreduktion vurderet i forhold til et nyt AB 11t slidlag:

- Belægninger med 6-10 mm sten giver støjreduktion på 2-4 dB.
- Belægningerne med 4 mm sten giver bedst støjreduktion, i bedste tilfælde helt op til 9 dB.
- Variationsområdet for ens belægninger op til 5-10 dB.
- For belægninger med 6 mm sten steg støjen 0,8 dB/år.
- For drænasfalt med 10 mm sten steg støjen 0,5 dB/år.
- For lastbiler var målt støjniveauer 1-7 dB under Nord2000-ref.



Figur 2.5: Boulevard Alexandre Millerand, Nantes. Overgang fra støjreducerende belægning (Microphone® 0/6 mm) til tæt asfaltbeton (AB 10t), som benyttes i decelerationsstykket op til og i rundkørslen.

Vigtige forhold ved udlægning af tyndlagsbelægninger:

- Anvendelse af færdigfremstillet polymer modificeret bitumen efter EN 14023.
- God klæbning til underlaget samt et jævnt underlag.
- Sikrer, at vand fra åbne belægninger ikke trænger ned i underlag. Udlægges ikke, hvor der forekommer drejende trafik.

Fysisk holdbarhed:

- I de senere år har der været observeret skader på nogle af de tynde slidlag.
- Der tilstræbes samme holdbarhed som med tætgraderet asfaltbeton, men det opnås ikke altid. Levetiden har i nogle tilfælde vist sig at være kortere end levetiden for andre belægningstyper.

Øvrige kommentarer:

- Der foregår forskning på området.
- Der skal gennemføres forsøg med anvendelse af genbrugsasfalt i et nyt støjreducerende slidlag (det er dog et meget specielt tilfælde af genbrugsasfalt).

2.3 Holland

Politik for brug af tyndlagsbelægninger:

- Politik at anvende drænasfalt på hele det statslige

motorvejsnet bl.a. for at reducere støjen både i det åbne land samt ved byområder.

- På kommune- og provinsveje anvendes ofte støjreducerende tynde slidlag på strækninger, hvor støjni-veauet er over 55 dB ved eksisterende boliger.

Belægningstyper som anvendes:

- Oplysninger om mixdesign er ofte ikke tilgængelig.
- Tynde slidlag typisk med hulrum på 9-14 %.
- Typisk en tykkelse på 25-30 mm.

Støjreduktion vurderet i forhold til et nyt AB 11t slidlag:

- Typisk 4-5 dB støjdæmpning ved 50 km/t og 5-6 dB ved 80 km/t for nye slidlag. Bedre støjdæmpning ved 110 km/t.
- For lastbiler på nye belægninger var støjdæmpningen 3-6 dB under Nord2000 ref. ved 80 km/t.
- Der var stor variation i stigningen pr. år. Ca. 0,7 dB/år for personbiler og ca. 0,5 dB/år for lastbiler.

Vigtige forhold ved udlægning af tyndlagsbelægninger:

- Høj andel bindemiddel på 6,5-7,5 % anvendes.
- Polymermodificeret bindemiddel med 4-6 % SBS anvendes efter EN 14023.



Figur 2.6:
Bygade med åbent tyndt slidlag i Holland.

- Et binderlag kan "genbruges" én gang til applikation af et nyt støjreducerende tyndt slidlag, men næste gang skal det også udskiftes.
- Ved bortfræsning af gamle slidlag skal man ned under den tidligere klæbezone.
- Udlægges ikke, hvor der forekommer drejende trafik.

Fysisk holdbarhed:

- I nogle tilfælde har der været problemer med holdbarheden af tynde slidlag, bl.a. afskalninger.
- Dårlig holdbarhed skyldes problemer med det anvendte mixdesign, problemer under udlægningen og/eller dårligt underlag.

Øvrige kommentarer:

- Mange forslag til forbedring af holdbarhed, hvad angår mixdesign, udlægningen og krav til underlag.
- Der planlægges nye forskningsprojekter for at udvikle belægninger med meget stor støjreduktion. Der vil være fokus på at forbedre langtidsstøjdæmpningen, og strukturel holdbarhed.
- Det tilstræbes at etablere lange strækninger med den samme slidlagstype, for at belægningsvedligeholdelsen er så ukompliceret som muligt.

2.4 Tyskland

Politik for brug af tyndlagsbelægninger:

- Pres fra befolkningen på at få støjreduktion.
- Tysk støjberegningsmodel har korrektioner for drænasfalt, og SMA-slidlag, men endnu ikke for tynde støjreducerende slidlag. Politisk pres for at få denne type inkluderet.
- I situationer, hvor der er brug for støjreduktion, anvendes drænasfalt – bl.a. på motorveje, selvom holdbarheden er kortere end normalt.

Belægningstyper som anvendes:

- Forskellige typer testes, bl.a. SMA, tykkelsen er 20-30 mm, hulrum op til 12 % og 5 eller 8 mm sten.
- "LOA 5 D" en type med 5 mm sten, hulrum omkring 6 % og lagtykkelsen er ca. 25 mm med gummimodificeret bindemiddel (vurderet af entreprenører til at være for mager).

Støjreduktion vurderet i forhold til et nyt AB 11t slidlag:

- Endnu ikke mange resultater fra forsøgsstrækninger.

2.5 Retningslinjer for optimeret holdbarhed

Der er rundt i Europa konstateret reduceret levetid for



Figur 2.7:

Forsøgsbelægninger på Konrad Adenauer Ufer i Köln med LOA 5D med Road+. Bemærk det store antal lyse sten ved kantstenen. Nærbil-lede af slidlaget med en dansk femkrone ses til højre.

støjreducerende tynde slidlag. I nogle tilfælde er der opstået skader – bl.a. i løbet af vinterperioden. Dette skyldes ofte en kombination af flere forhold, hvor følgende kan fremhæves:

1. At et tyndt slidlag er blevet udlagt på et ujævnt underlag af dårlig kvalitet.
2. At der ikke var en god membran, som ellers skulle sikre at der ikke trængte vand ned i binderlaget. Den delvist åbne struktur og lille lagtykkelse kan medføre, at vand trænger i gennem slidlaget og ned i binderlaget, hvor der kan forekomme skader i vinterperioden pga. frostsprængninger.
3. At der forekom drejende/vridende trafik.
4. At udlægning fandt sted forholdsvis sent på året.

Der foregår løbende forsknings- og udviklingsaktiviteter for at udvikle bedre støjreducerende slidlag med optimeret støjreduktion og god fysisk holdbarhed. Der er fokus på at forbedre langtidssøjddæmpningen og holdbarheden. Akustisk optimering af støjreduktionen for tynde slidlag kan bl.a. foretages ved at anvende:

1. Lille maksimal kornstørrelse typisk 6 eller 8 mm. 4 mm er dog også anvendt med god støjddæmpning.
2. Et stort indbygget hulrum som for tyndlagsbelægninger ligger 8-12 % med halvåbne porer. Hulrum over 18-20 % anvendes dog også, især for belægninger med 4 mm sten.

På baggrund af de på studierejsen indsamlede belægningstekniske informationer kan der opstilles følgende sammenfatning for tynde støjreducerende slidlag. Optimering af holdbarheden for tynde støjreducerende slidlag kan foretages ved at anvende følgende retningslinjer:

1. Lagtykkelsen skal ikke være under 30 mm.
2. Typisk Marshall-hulrum 8-12 % som halvåbne porer med en åben overfladetekstur.
3. Slidlag kan udvikles i en tykkelse der er væsentligt større end 3-4 gange den maksimale kornstørrelse uden at risikere sporkøring.
4. Slidlaget skal udlægges på nyudlagt underlag (typisk binderlag) eller på et gammelt slidlag i god stand.

5. Fræset overflade er speciel kritisk og skal undgås. Hvis det benyttes, skal det være fintandet fræsning, og ujævnheden fra rillerne på fræset overflade må maksimalt være 3 mm.
6. Underlaget skal have det korrekte profil. Tynde, støjreducerende slidlag kan ikke benyttes til opretning.
7. Der skal anvendes en forholdsvis høj procentdel bindemiddel.
8. Der skal anvendes polymermodificeret bitumen, som skal være færdigfremstillet (i henhold til DS/EN 14023) og ikke "in-situ"-tilvirket.
9. Der anvendes ikke genbrug i tynde, støjreducerende slidlag.
10. Slidlag udføres fra 15. april til 15. september.
11. Forseglingsemulsion er nogle gange anvendt, men der er ikke nogen bevist effekt på holdbarheden, men man vurderer dog i Holland en forbedring af levetiden på 1-3 år.
12. God klæbning til underlaget er essentielt samt et jævnt underlag
13. Man skal sikre, at vand fra åbne belægninger ikke trænger ned i underlag.
14. Hvis penge til slidlagsarbejder "frigøres" efter 1. september, bør de anvendes til nye binderlag, hvor nyt slidlag kan udlægges den følgende sommer. Denne strategi er bedre end sent udførte støjreducerende slidlag.
15. Man skal undgå udførelse af håndudlægning.
16. Uddannet og erfarent personale på udlæggerholdet, da det kræver speciel erfaring at udlægge et tyndt støjreducerende slidlag.
17. Støjreducerende, tynde slidlag skal undgås, hvor der forekommer drejende trafik samt opbremsende/accelererende trafik, i og ved rundkørsler, på kørebaner med forventede stop (betalingsanlæg, busholdepladser etc.) samt på opmarchbåse til trafiklysregulerede kryds etc.

3. Vurderinger af belægninger meget lille maksimal kornstørrelse

Erfaringerne fra Europa indikerer, at der er et potentiale for at opnå en høj støjreduktion ved anvendelse af en lille maksimal stenstørrelse på kun 4 mm samt en meget åben overfladestruktur, da dette skulle sikre en meget jævn overfladetekstur, som reducerer genereringen af vibrationer i dækkene og dermed støjudsendelsen fra dækkets kontakt med belægningsoverfladen. Stenmateriale med denne størrelse markedsføres normalt ikke i Danmark og er derfor et specialprodukt, som skal produceres til en given opgave. Dette er nok en af årsagerne til, at der ikke findes mange danske erfaringer med denne type tynd slidlag. Der er dog tre vejstrækninger, hvor Vejdirektoratet over en årrække har foretaget støjmålinger på sådanne belægninger. Måleresultaterne for disse belægninger præsenteres i det følgende for at belyse det mulige støjreducerende potentiale for denne type belægninger.

Det drejer sig om forsøgsstrækningen med optimerede tynde slidlag på Kastrupvej, som blev etableret i samarbejde med Københavns Kommune i 2007 [16]. Her blev der bl.a. udlagt to belægninger med en maksimal stenstørrelse på 4 mm:

- SMA 4, skærvemastiks med maksimal stenstørrelse på 4 mm og en åben overfladestruktur med et indbygget hulrum på 6,4 %.
- SMA 4+8, skærvemastiks med maksimal stenstørrelse på 4 mm samt en lille mængde 8 mm overkorn for at åbne belægningsoverfladen yderligere. Det indbyggede hulrum er på 7,6 %.

Kastrupvej er en bygade med en årsdøgntrafik på 7.500 køretøjer, heraf er 7 % tunge køretøjer og en skiltet hastighed på 50 km/t. På strækningen findes desuden en tæt asfaltbeton med 11 mm sten (AB 11t), der anvendes som referencebelægning samt fem andre tynde slidlag

med 6 og 8 mm maksimal stenstørrelse. Støjmålinger for disse belægninger er dokumenteret i [16 og 17].

På hovedlandevej M68 ved Herning blev der af Vejdirektoratet i 2008 etableret en forsøgsstrækning med ni optimerede tynde slidlag bl.a. en SMA 4+8 belægning [17]. Denne SMA 4+8 er ligeledes en skærvemastiks med maksimal stenstørrelse på 4 mm samt en lille mængde 8 mm overkorn for at åbne belægningsoverfladen yderligere. Dette slidlag har et indbygget hulrum på 8,0 %. På denne strækning findes desuden en tæt asfaltbeton med 11 mm sten (AB 11t), som anvendes som referencebelægning. M68 har en årsdøgntrafik på 6.500 og en skiltet hastighed på 90 km/t. Støjmålinger for disse belægninger er dokumenteret i [17].

På en vej er der udlagt et slidlag, som vurderes at have 4 mm maksimal stenstørrelse. Der foreligger ikke yderligere data om denne belægning. Årsdøgntrafikken er omkring 3-5.000 køretøjer og den skilte hastighed er 80 km/t.

I det følgende præsenteres resultater fra årlige støjmålinger udført på disse strækninger med 4 mm sten. Der foretages sammenligning til AB 11t-referencebelægningerne på disse strækninger. Resultaterne sammenlignes ligeledes med reference-støjniveauet i den danske støj-beregningsmodel Nord2000 [18, 19], der repræsenterer en AB 11t, som er otte år gammel. Referenceniveauerne i Nord2000 er vist ved forskellige hastigheder og for de tre køretøjskategorier: personbiler samt tunge køretøjer med to aksler eller med flere end to aksler. Disse referenceniveauer er empirisk fastlagt ud fra omfattende målinger på udvalgte vejstrækninger i Danmark.

Resultaterne for personbiler præsenteres i afsnit 3.3 til 3.5 både som absolutte støjniveauer (korrigeret til 20 °C) samt som de dertil hørende frekvensspektre. Som baggrund for at kunne vurdere resultaterne præsente-

Køretøjskategori	50 km/t [dB]	60 km/t [dB]	80 km/t [dB]	85 km/t [dB]	90 km/t [dB]	110 km/t [dB]
Personbil	71,8	74,3	78,6	79,6	80,5	83,8
Tunge, to aksler	79,8	81,7	85,3	86,1	-	-
Tunge, flere aksler	82,5	84,3	87,7	88,5	-	-

Tabel 3.1:

Referenceværdierne for NORD2000s referencebelægning (gennemsnit for en otte år gammel AB 11t) ved forskellige hastigheder for de tre køretøjskategorier udtrykt som SPB niveauer [18].

res i afsnit 3.1 en kort gennemgang af de mekanismer, som har betydning for generering af dæk/vejbane-støj for tynde åbne slidlag efterfulgt af afsnit 3.2 med kort præsentation af, hvordan måleresultater fra henholdsvis SPB- og CPX-metoderne kan sammenlignes. Ved SPB-metoden [10] måles støjen i vejsiden på udvalgte enkelte køretøjer og ved CPX-metoden anvendes en støjtrailer som fx Vejdirektoratets "deciBella".

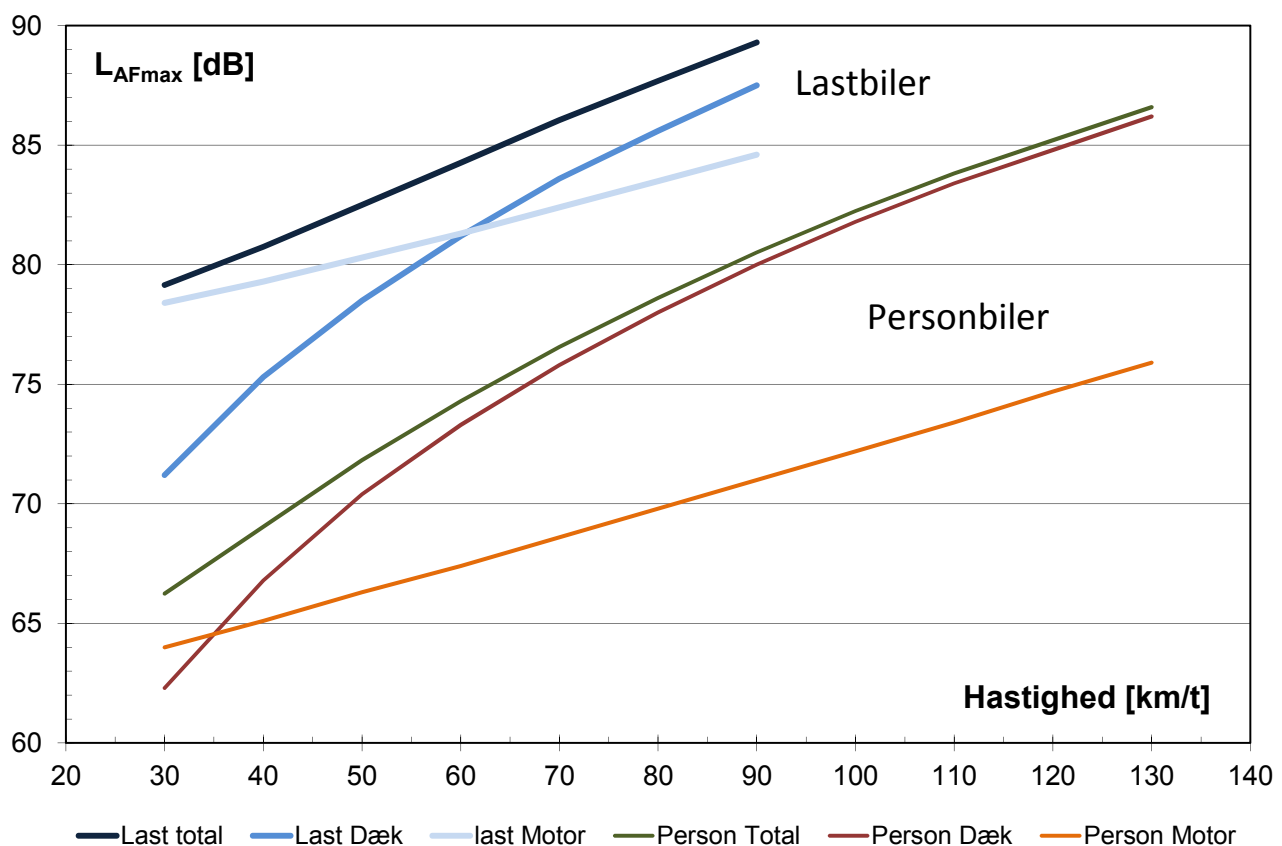
3.1 Støjgenererende mekanismer af betydning for tynde åbne slidlag

De to primære støjklender fra vejtrafik er motorstøj og dæk/vejbane-støj. Som det fremgår af figur 3.1, er motorstøjen kun betydelig for personbiler ved lav fart. Ved hastigheder over 35 km/t er dæk/vejbane-støjen den dominerende støjklender for personbiler. For flerakslede tunge køretøjer bliver dæk/vejbane-støjen først dominerende ved 60 km/t. De totale niveauer for både personbiler og flerakslede tunge køretøjer svarer til referenceværdierne i tabel 3.1.

Den støj, der genereres, når et dæk ruller over en vejbelægning, vurderes primært at være bestemt af følgende

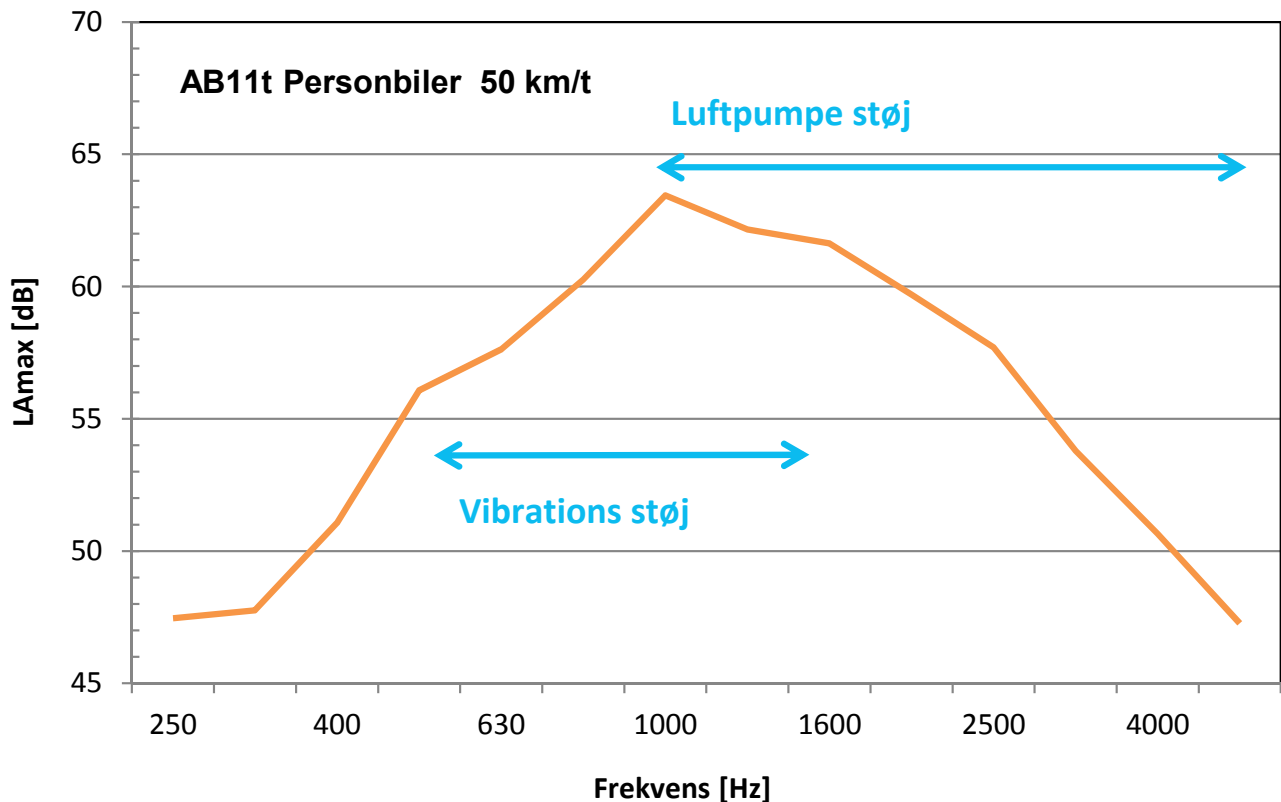
mekanismer, selv om andre mekanismer også kan have en mindre betydningsfuld rolle [20]:

1. Vibrationer i dækkene. Disse vibrationer genereres ved kontakten mellem gummiblokkene på dækkets overflade og ujævnhederne på vejoverfladen, når dækket ruller hen over belægningsoverfladen. Det vibrerende dæk sætter den omgivende luft i svingninger; dermed opstår støj. Denne støj ligger i det lavfrekvente område fra omkring 500 til 1.600 Hz. Støjen stiger, når belægningsoverfladen bliver mere ru og ujævn. Derfor vil en forøgelse af den maksimale stenstørrelse normalt medføre en forøgelse af støjniiveauet. Som tommelfingerregel stiger støjen alt andet lige omkring 0,25 dB, når stenstørrelsen forøges med 1 mm.
2. Støj fra luftpumpning. Når gummiblokkene på dækkets overflade rammer vejoverfladen, presses gummiblokkene sammen, og luft mellem gummiblokkene presses ud til omgivelserne. Når gummiblokkene igen forlader vejoverfladen, gendannes hulrummene mellem gummiblokkene, og der suges luft fra om-



Figur 3.1:

Motorstøj og dæk/vejbane-støj samt den totale støj for henholdsvis personbiler samt flerakslede tunge køretøjer. Disse støjniveauer repræsenterer kørsel ved jævn fart på en otte år gammel tæt asfaltbeton (referencebelægning i Nord2000). Figuren er baseret på data fra NORD2000 [18].



Figur 3.2:

Typisk frekvensspektrum for støjen fra personbiler målt i vejsiden med SPB-metoden ved en tæt vejbelægning [17].

givelserne ind i disse hulrum. Denne luftpumpning genererer en højfrekvent støj i frekvensområdet over 1.000 Hz. Hvis belægningsoverfladen har en åben struktur, vil en del af luften i stedet blive pumpet ned i hulrummene i vejoverfladen, hvorved støjen vil blive reduceret.

3. Horneffekten. Den kurveformede overflade af dækket samt vejoverfladen fungerer som et akustisk horn, der forstærker den støj, som genereres i kontaktpunktet mellem dækket og vejoverfladen. Hvis vejoverfladen har en åben struktur, vil vejsiden af det akustiske horn virke lydabsorberende. Dette vil reducere den forstærkende effekt. Drænasfalt kan bl.a. anvendes til at opnå denne støjreducerende effekt.
4. Absorption under udbredelse. Motorstøjen og dæk/vejbane-støjen udbredes fra køretøjet til omgivelserne. I denne proces vil noget af støjen blive reflekteret på vejoverfladen. Hvis vejoverfladen har en åben porestruktur, og dermed lydabsorberende, vil dette reducere den udsendte støj ved nogle frekvenser, normalt under 1.000 Hz. Denne absorption afhænger af det åbne lags tykkelse og det indbyggede hulrum. Drænasfalt kan bl.a. anvendes til at opnå denne støjreducerende effekt.
5. Betydningen af vejbelægningens elasticitet. Styrken af den vibrationsgenererede støj afhænger ligeledes af, hvor elastisk vejbelægningen er. Hvis vejbelægning-

gen har en elasticitet af samme størrelsesorden som et bildæk, vil støjen kunne reduceres. Dette kan fx være tilfældet, hvis noget af stenmaterialet i vejbelægningen udskiftes med gummigranulat [3].

Figur 3.2 viser et typisk frekvensspektrum fra en SPB-måling på en tæt asfaltbeton. Figuren viser områderne, hvor den vibrationsgenererede lavfrekvente støj (500 til 1.600 Hz) samt den højfrekvente støj (over 1.000 Hz) genereret fra luftpumpning bidrager til støjen fra en forbi kørende bil. Det kan ses, at i frekvensområdet 1.000 til 1.600 Hz kan der både forekomme støj fra luftpumpning samt vibrationsgenereret støj.

Der findes to former for åben belægningsstruktur:

- Drænasfalt som har kommunikerende porer i hele slidlagets tykkelse.
- Åbne belægninger – uden kommunikerende porer i hele slidlagets tykkelse – har en åben struktur i den øverste del af slidlagets overflade med "fordybninger", som normalt er mindre end halvdelen af den maksimale stenstørrelse.

Den grundlæggende ide ved at anvende tynde åbne slidlag som støjreducerende belægninger er at skabe en åben overfladestruktur med så store "fordybninger" som muligt. Med den åbne struktur kan belægningen delvist reducere den luftpumpegenererede støj. Samtidig er det



"Positiv overfladestruktur"



"Negativ overfladestruktur"

Figur 3.3:

Principskitse af en belægning med henholdsvis en positiv og en negativ overfladestruktur [17].

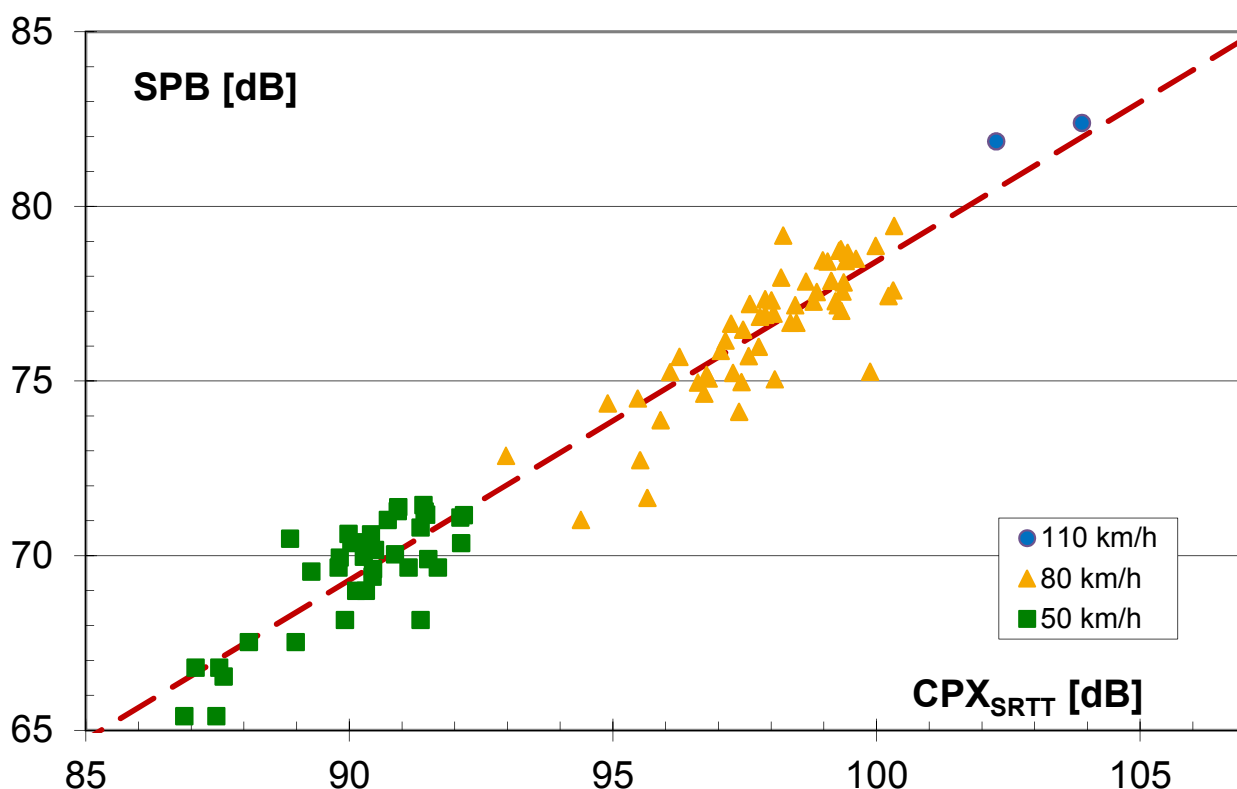
nødvendigt at sikre, at belægningens overflade er jævn for at minimere den vibrationsgenererede støj. Sådanne støjreducerende belægninger kan være tynde, da de mekanismer, som er bestemmende for støjgenereringen, kun afhænger af belægningens overfladestruktur. Det er således primært de to mekanismer vibrationer i dækkene samt støj fra luftpumpning som har betydning for støjen fra åbne tynde slidlag. For drænasfalt har horneffekten samt absorption under udbredelse ligeledes en betydning for støjen og nye drænasfalt slidlag vil typisk have et "dip" i frekvensspektret et sted mellem 300 og 1.000 Hz afhængigt af slidlagets tykkelse.

Figur 3.3 illustrerer to forskellige typer vejoverflader, som begge har en åben struktur. Belægningen med

en "positiv" konveks overfladestruktur vil forøge den vibrationsgenererede støj. Belægningen med en "negativ" konkav struktur vil generere mindre vibrationsstøj. God komprimering i forbindelse med udlægningen samt anvendelse af et kubisk stenmateriale vil medvirke til at skabe en vejoverflade med en overvejende "negativ" overfladestruktur.

3.2 Sammenhæng mellem SPB- og CPX-målinger

Nogle af støjmålingerne er udført med anvendelse af SPB-målemetoden (se figur 3.5), hvor støjen måles i vejsiden på et tilfældigt udvalg af biler som passerer målestedet. Andre målinger er udført med anvendelse af Vejdirektoratets støjtrailer "deciBellA" efter den såkaldte

**Figur 3.4:**

Sammenhæng mellem resultater fra SPB- og CPX-målinger udført på støjreducerende tynde slidlag og AB 11t slidlag [5].

Fart [km/t]	50	60	70	80	90	100	110
SPB referenceniveau [dB]	72,0	74,6	76,9	78,9	80,8	82,5	84,1
CPX [dB]	93,0	95,8	98,3	100,5	102,6	104,4	106,1

Tabel 3.2:

Empirisk bestemt sammenhæng mellem SRS-systemets referenceniveauer bestemt ved SPB-målinger og CPX-resultater ved forskellige hastigheder baseret på figur 3.4 [5].



Figur 3.5:
Mikrofonopstilling i vejsiden ved udførelse af SPB-støjmåling.



Figur 3.6:
Vejdirektoratets støjtrailer deciBella. På billedet til højre ses det, at mikrofonerne sidder meget tæt på kontaktpunktet mellem måledæk og vejoverflade.

CPX-metode (se figur 3.6). Der vil være et behov for at kunne sammenligne resultaterne fra disse to metoder. Vejdirektoratet har gennem de seneste 10 år gennemført mange støjmålinger på forskellige slidlag [17] primært støjreducerende tynde slidlag og AB 11t slidlag. På denne baggrund er der i [5] for nye belægninger opstillet en empirisk sammenhæng mellem resultater fra SPB- og CPX-metoderne som fremgår af figur 3.4 samt formlen:

$$\text{SPB} = 0,921 \times \text{CPX} - 13,68 \quad (1)$$

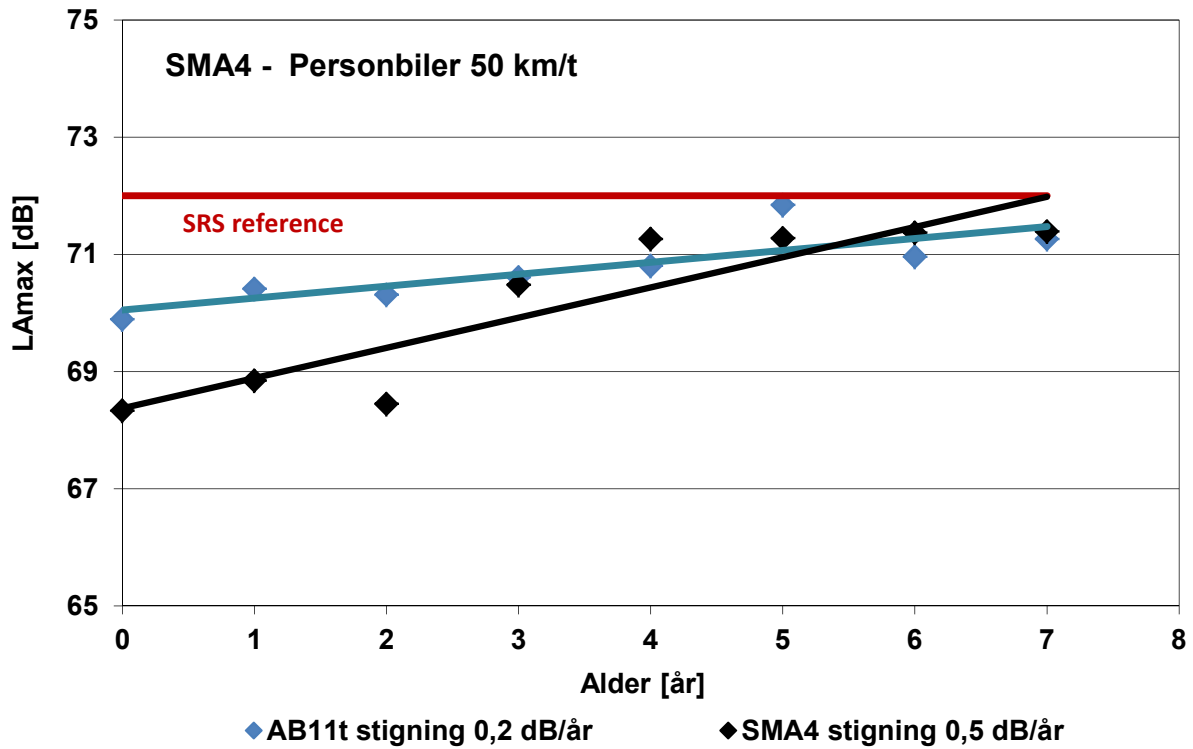
For drænasfalt kan der forekomme mindre afvigelser.

Tabel 3.2 viser de referenceniveauer, som bliver anvendt i SRS-systemet [5]. Det er i SRS-systemet besluttet at anvende et referenceniveau, der udtrykker den gennemsnit-

lige støj for AB 11t og SMA 11 slidlag. Dette betyder at SRS-systemets referenceniveauer ligger 0,3 dB højere end Nord2000 referenceniveauerne, som repræsenterer et AB 11t slidlag.

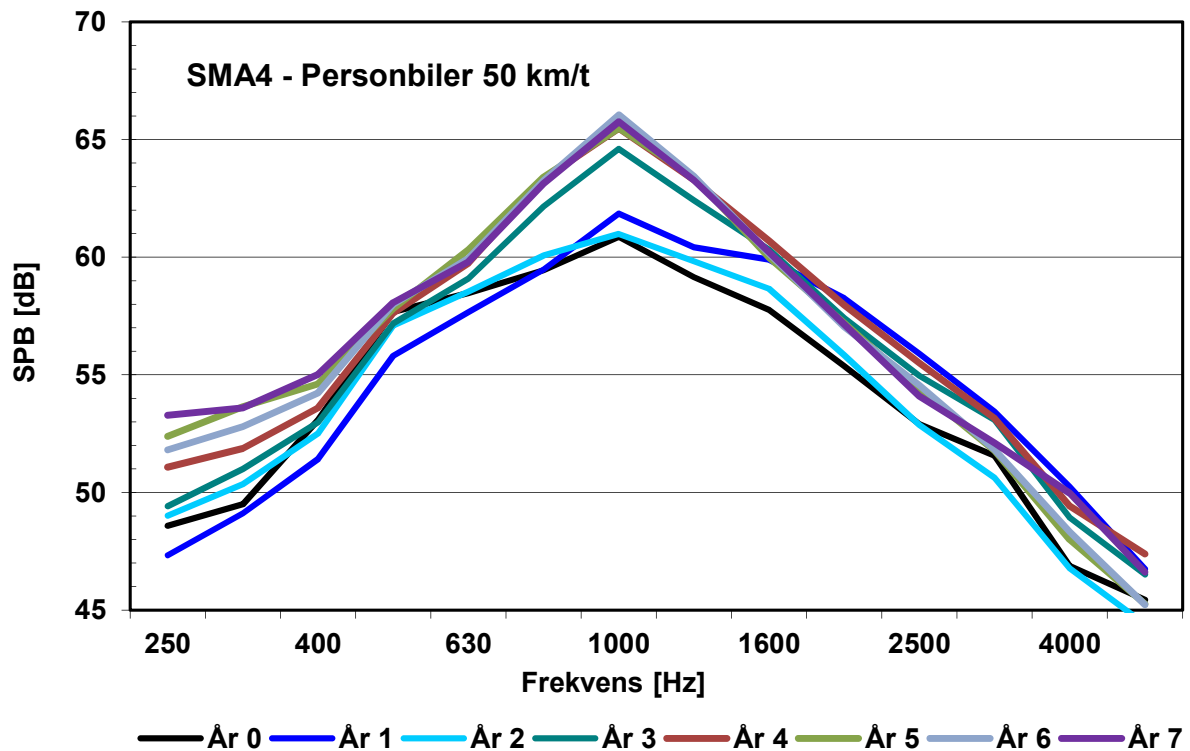
3.3 Resultater fra forsøg på en bygade

Hovedresultaterne fra SPB-støjmålinger, udført over en periode på syv år på SMA 4-slidlaget på Kastrupvej fremgår af figur 3.7, viser, at støjniveauet starter på 68,3 dB stiger 0,5 dB pr. år. I figuren vises desuden reference-slidlaget AB 11t på Kastrupvej samt SRS-referenceniveauet. Da slidlagene er nye havde SMA 4 en støjreduktion på 1,6 dB i forhold til AB 11t-referencen på Kastrupvej. Den årlige stigning for SMA 4 er på 0,5 dB. Det betyder, at efter fem år er støjniveauet ens for de to slidlag. Da SMA 4 er ny, er reduktionen i forhold til SRS-



Figur 3.7:

Resultater fra SPB-målinger på SMA 4-slidlaget samt reference-slidlaget AB 11t på Kastrupvej for personbiler ved 50 km/t. Der er indlagt lineære regressionslinjer. Desuden vises det tilsvarende SRS-referenceniveau.

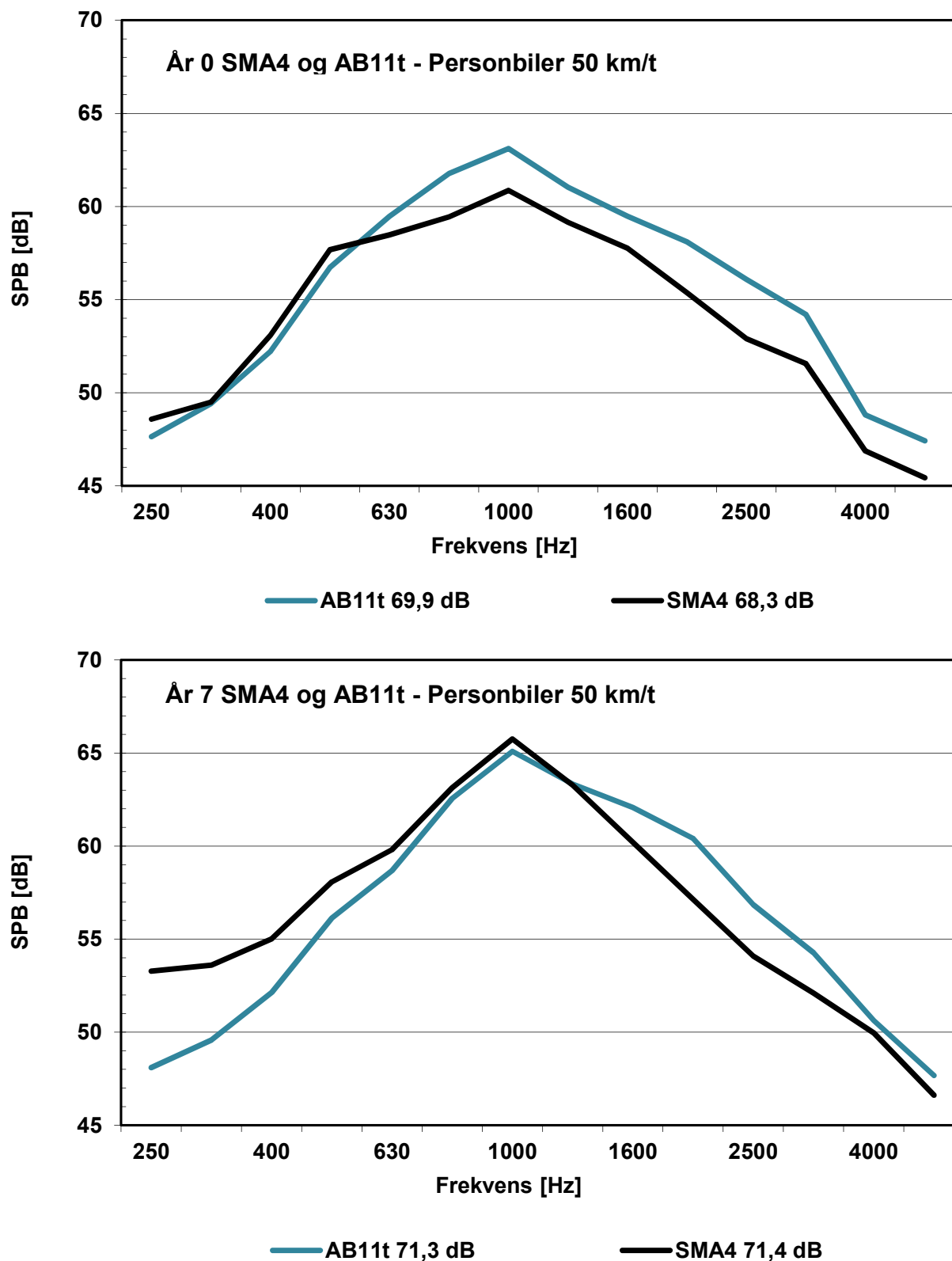


Figur 3.8:

Spektre for SMA 4-slidlaget for personbiler ved 50 km/t for hvert år.

referenceniveauet 3,7 dB, hvilket betyder, at belægningen netop ikke kan klassificeres som et "SRS standard" slidlag da dæmpningen skulle have været mindst 4,0 dB. Efter syv år når SMA 4-slidlaget SRS-referenceniveauet.

Udviklingen af frekvensspektret over årene kan indikere noget om ændringer i slidlagenes overfladetekstur som har betydning for støjen jævnfør afsnit 3.1. Spektre fra SMA 4 vises i figur 3.8. I løbet af de første to år stiger



Figur 3.9:
Spektre for AB 11t og SMA 4 på Kastrupvej i år 0 (øverst) og i år 7 (nederst) for personbiler ved 50 km/t.

niveauet over 1.600 Hz (støj fra luftpumpning), hvilket indikerer, at overfladen bliver mere tæt. Fra det andet år stabiliseres støjen i dette frekvensområde. I frekvensområdet fra 500 til 1.600 Hz er støjen konstant de første to år for derefter at stige markant. Dette indikerer, at belægningsoverfladen fra år 2 bliver mere ru og ujævn, således at den vibrationsgenererede støj øges.

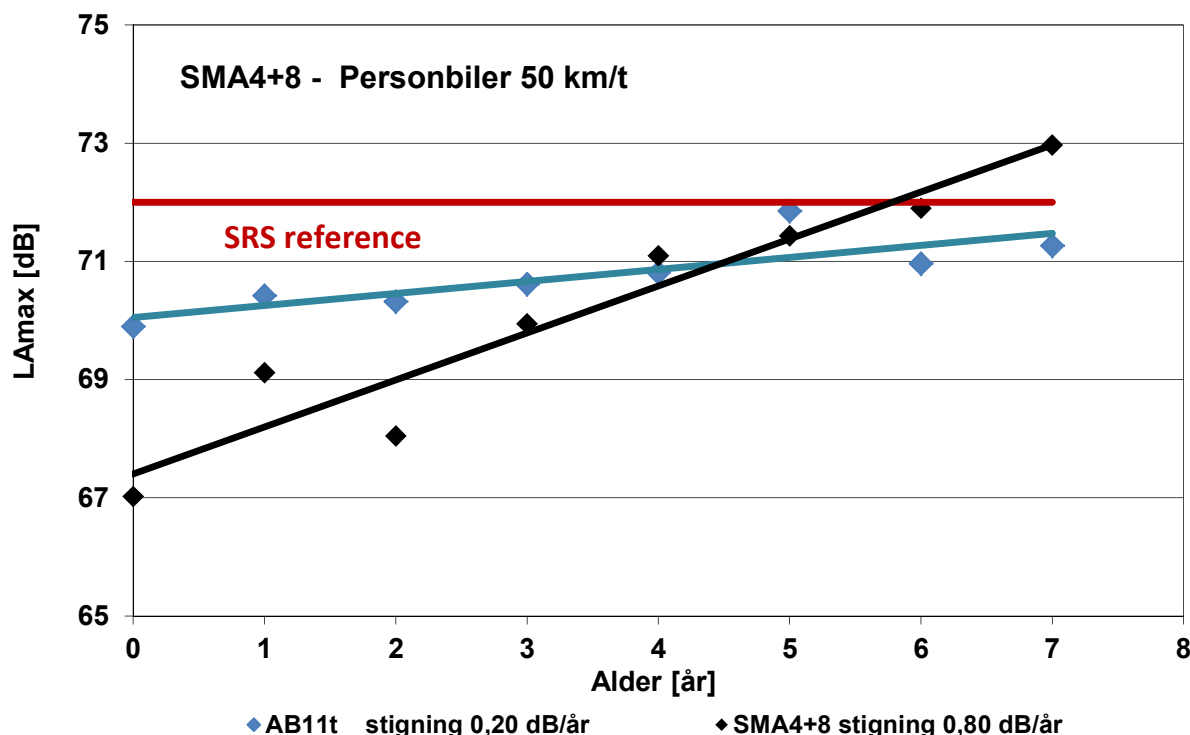
I figur 3.9 sammenlignes spektrene for AB 11t-reference-slidlaget med SMA 4 da slidlagene var nye og efter syv år. Da slidlagene er nye ligger SMA 4 ca. 2 dB under AB 11t i hele frekvensspektret over 500 Hz, hvilket indikerer at SMA 4 både har en mere jævn og en mere åben overfladestruktur end AB 11t. Efter syv år ændres dette billede. I det højfrekvente område ligger SMA 4 stadig lidt under AB 11t, hvilket indikerer, at SMA 4 stadig har en lidt mere åben overfladestruktur. Men for frekvenser lavere end 1.200 Hz ligger SMA 4 stort set på niveau AB 11t, hvilket indikerer, at belægningen har udviklet en lige så ujævn overfladetekstur end AB 11t.

Hovedresultaterne fra SPB-støjmålinger udført over en periode på syv år på SMA 4+8 slidlaget på Kastrupvej fremgår af figur 3.10. Figuren viser, at støjniveauet starter på 67,0 dB, hvilket er godt 1 dB lavere end SMA 4-slidlaget. Den årlige stigning er på 0,8 dB pr. år og ligger over SMA 4. I figuren vises desuden reference-slidlaget AB 11t på Kastrupvej samt SRS-referenceniveauet. Da slidlagene er nye havde SMA 4+8 en støjreduktion på

2,9 dB i forhold til AB 11t-referencen. SMA 4+8 har en årlig stigning på 0,8 dB. Dette betyder at efter fire år er støjniveauet ens for de to slidlag. Da SMA 4+8 er ny, er reduktionen i forhold til SRS-referenceniveauet 5,0 dB – hvilket betyder, at belægningen kan klassificeres som et "SRS standard"-slidlag. Efter 5½ år nås SRS-referenceniveauet.

Udviklingen af frekvensspektret over årene fra SMA 4+8 slidlaget ses i figur 3.11. Udviklingen følger de samme tendenser som for SMA 4. I løbet af de første to år stiger niveauet over 1.600 Hz, hvorefter det stabiliseres. I frekvensområdet fra 500 til 1.600 Hz stiger niveauet markant allerede fra slidlaget er nyt. Dette indikerer, at belægningsoverfladen løbende bliver mere ru og ujævn, således at den vibrationsgenererede støj øges.

I figur 3.12 sammenlignes spektrene for AB 11t-referencenslidlaget med SMA 4+8 da slidlagene var nye og efter syv år. Da slidlagene er nye ligger SMA 4+8 ca. 4 dB under AB 11t i hele frekvensspektret over 500 Hz, hvilket indikerer at SMA4+8 både har en mere jævn og en mere åben overfladestruktur end AB 11t. Efter syv år ændres dette billede. I det højfrekvente område ligger SMA 4+8 stort set på niveau med AB 11t, hvilket indikerer, at SMA 4+8 har en lige så tæt overfladestruktur som AB 11t. For frekvenser lavere end 1.200 Hz ligger SMA 4+8 2 dB højere end AB 11t, hvilket indikerer, at slidlaget har udviklet en mere ujævn overfladetekstur end AB 11t.



Figur 3.10: Resultater fra SPB-målinger på SMA 4+8 slidlaget samt reference-slidlaget AB 11t på Kastrupvej for personbiler ved 50 km/t. Der er indlagt lineære regressionslinjer. Desuden vises det tilsvarende SRS-referenceniveau.

3.4 Resultater fra forsøg på en hovedlandevej

Hovedresultaterne fra SPB-støjmålinger udført over en periode på seks år på SMA 4+8 slidlaget på M68 fremgår af figur 3.13. Figuren viser, at støjniveauet starter på 75,9 dB og stiger 0,9 dB pr. år. I figuren vises desuden reference-slidlaget AB 11t på M68 samt SRS-referenceniveauet. Da slidlagene er nye havde SMA 4+8 en støjreduktion på 1,2 dB i forhold til AB 11t-referencen. Den årlige stigning er 0,9 dB for SMA 4+8. Dette betyder at efter tre år er støjniveauet ens for de to slidlag. Da SMA 4+8 er ny er reduktionen i forhold til SRS-referenceniveauet 4,9 dB, hvilket betyder, at belægningen kan klassificeres som en "SRS standard"-belægning. Efter seks år når SMA 4+8 SRS-referenceniveauet.

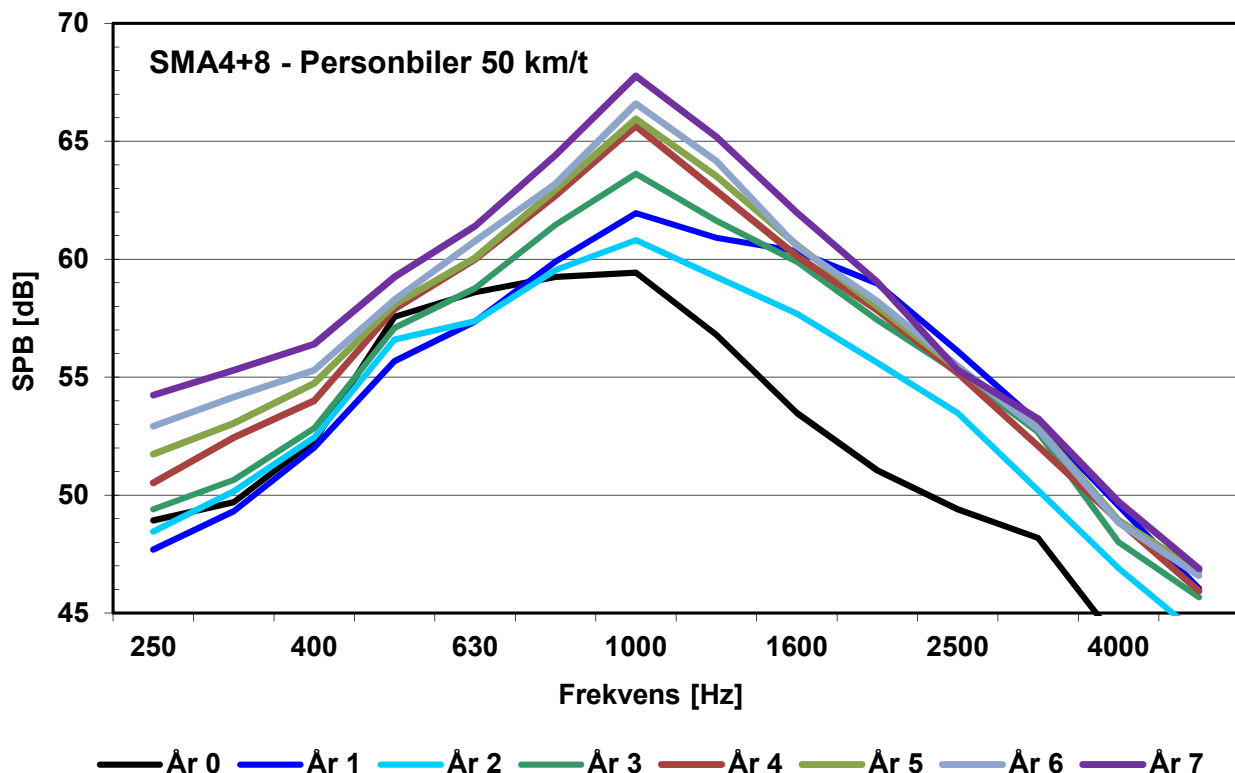
Udviklingen af frekvensspektret over årene fra SMA 4+8 slidlaget ses i figur 3.14. Udviklingen over årene er i store træk den samme som for SMA 4+8 slidlaget på Kastrupvej. I løbet af de første tre år stiger niveauet over 1.000 Hz, hvorefter det stabiliseres. Dette indikerer, at slidlaget i løbet af de første tre år får en mere tæt overfladestruktur, som medfører forøget luftpumpestøj. I frekvensområdet fra 500 til 1.000 Hz er støjen stabil de første tre år, hvorefter den stiger markant. Dette indikerer, at belægningsoverfladen efter tre år bliver mere ru og ujævn, således at den vibrationsgenererede støj øges.

I figur 3.15 sammenlignes spektrene for AB 11t-referenceniveauet med SMA 4+8 da slidlagene var nye og

efter fem år. Da slidlagene er nye ligger SMA 4+8 ca. 2 dB under AB 11t i hele frekvensspektret over 800 Hz, hvilket indikerer at SMA 4+8 både har en lidt mere jævn og en mere åben overfladestruktur end AB 11t. Efter fem år ændres dette billede. De to slidlag har nu nærmest samme støjniveau på henholdsvis 79,8 og 79,6 dB. I det højfrekvente område ligger SMA 4+8 op til 3 dB under AB 11t, hvilket indikerer, at SMA 4+8 stadig har en mere åben overfladestruktur end AB 11t. For frekvenser lavere end 1.000 Hz ligger SMA 4+8 efter fem år 2 dB højere end AB 11t, hvilket indikerer, at slidlaget har udviklet en mere ujævn overfladetekstur end AB 11t.

3.5 Resultater fra slidlag med 4 mm skærver

Der er over en periode på seks år foretaget CPX-støjmålinger på et slidlag, som vurderes at have 4 mm maksimal stenstørrelse. Resultaterne er omregnet til SPB-støjniveauer ved hjælp af formel 1. Hovedresultaterne, omregnet til SPB niveauer ved 80 km/t, fremgår af figur 3.16; figuren viser, at støjniveauet starter på 70,4 dB og stiger med 1,0 dB pr. år. I figuren vises desuden reference-slidlaget AB 11t på M68 omregnet til 80 km/t samt SRS-referenceniveauet også ved 80 km/t. Resultaterne er ekstrapoleret lineært til år 9. Da slidlagene var nye, havde slidlaget med 4 mm skærver en støjreduktion på 4,8 dB i forhold til AB 11t-referencen. Den årlige stigning ligger på 1,0 dB, så efter otte år er støjniveauet ifølge ekstrapoleringen ens for de to slidlag. Da slidlaget med 4 mm skærver er nyt, ligger det 8,5

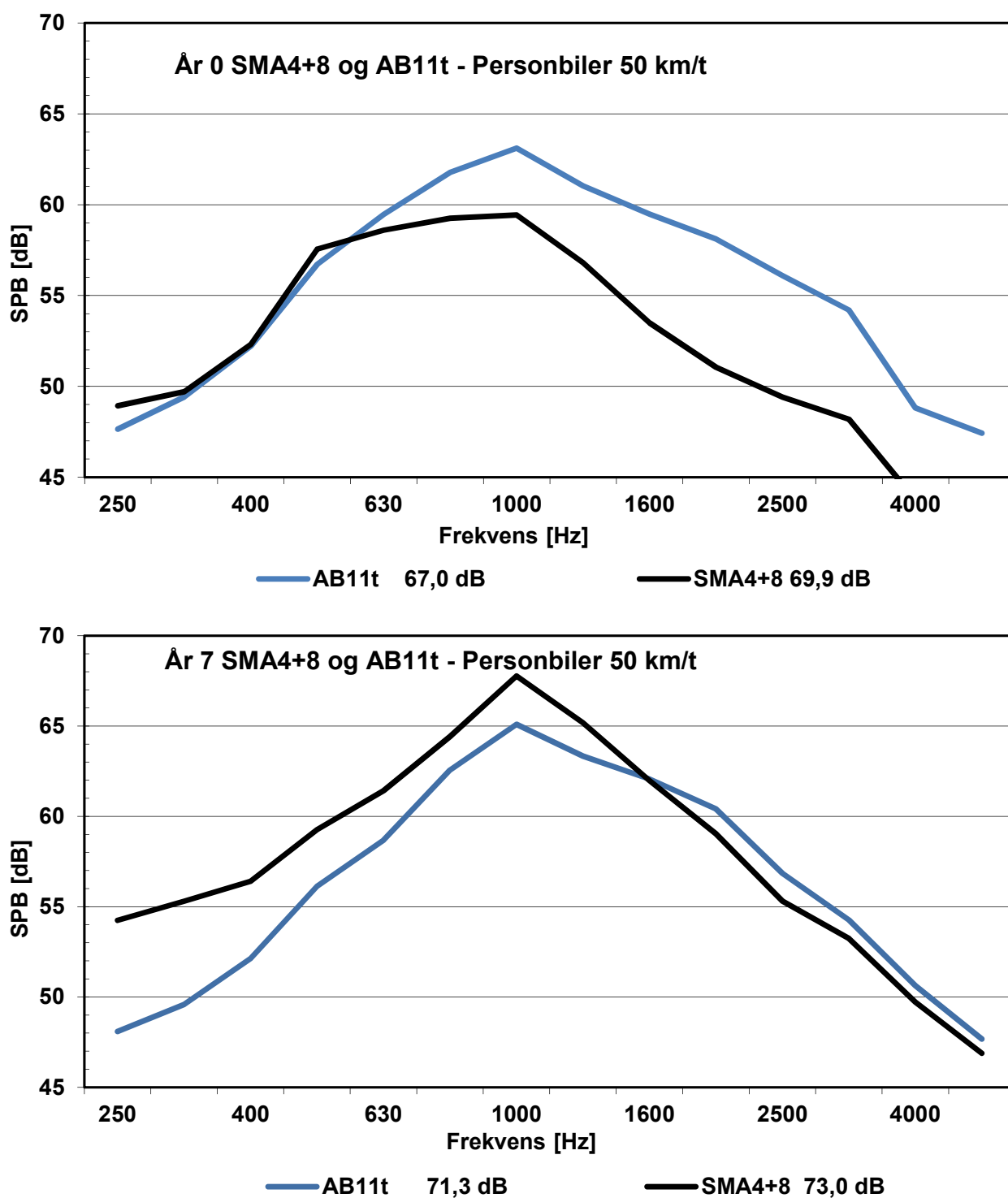


Figur 3.11: Spektre for SMA 4+8 slidlaget for personbiler ved 50 km/t for hvert år.

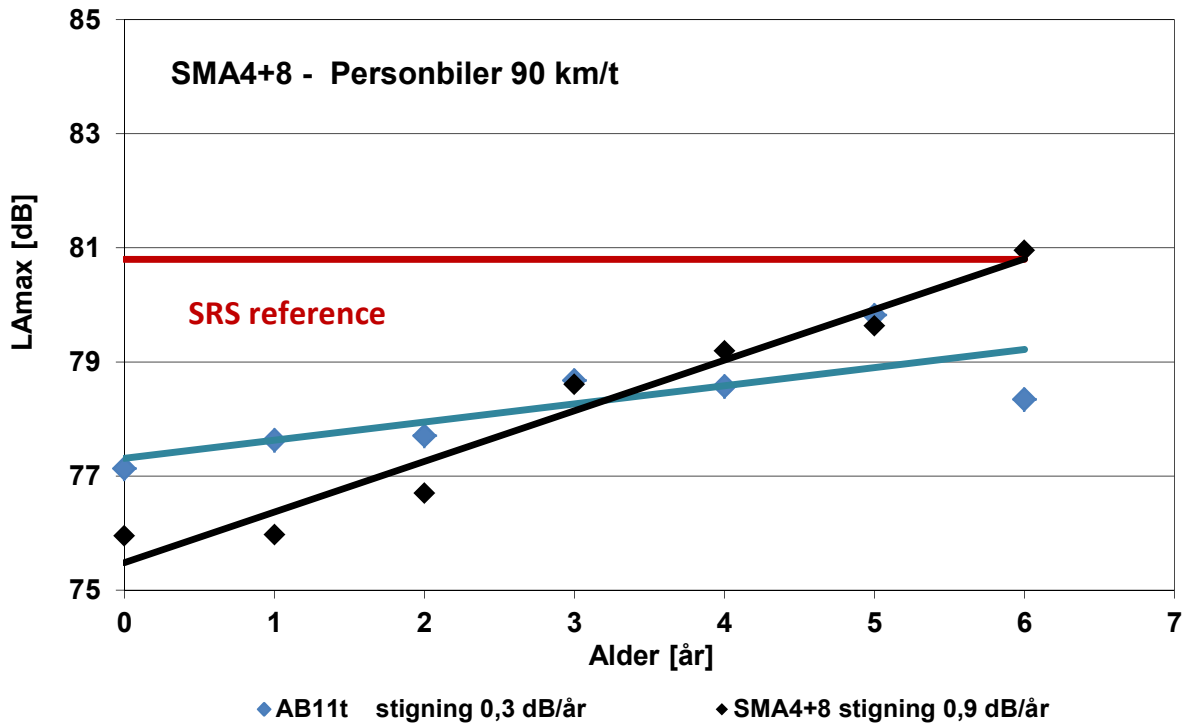
dB under SRS-referenceniveauet og ville således kunne opnå en "SRS speciel"-klassifikation i anden generation af SRS-systemet, da støjreduktionen er større end 7 dB. Efter omkring ni år når dette slidlag ifølge ekstrapolationen SRS-referenceniveauet.

Udviklingen af frekvensspektret over årene for slidlaget med 4 mm skærver ses i figur 3.17 (vist som CPX-

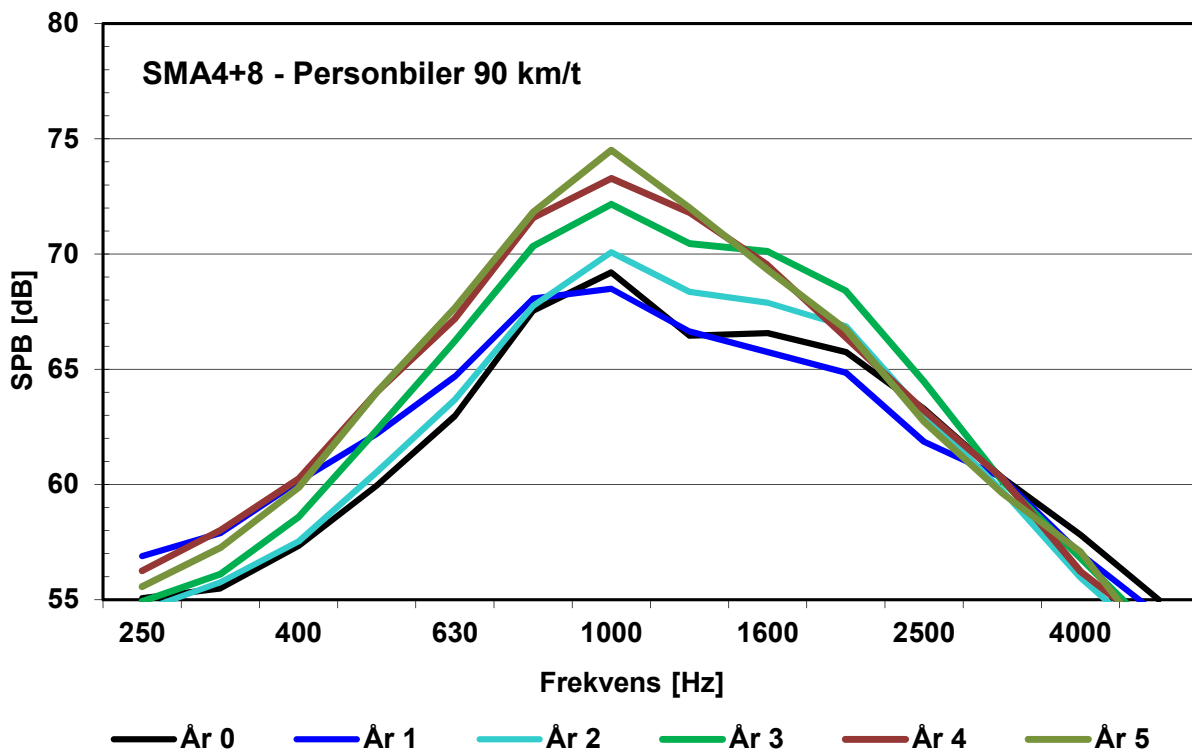
niveauer). Der sker en markant stigning af støjen i hele frekvensspektret fra år 1 til år 2, hvorefter spektret ikke ændres væsentligt i de følgende år. For frekvensområdet under 1.600 Hz indikerer dette, at slidlaget får en mere ru og ujævn overfladestruktur, således at den vibrations-genererede støj øges. I frekvensområdet over 1.000 Hz indikerer dette, at slidlaget får en mere tæt overfladestruktur, som medfører forøget luftpumpestøj. Udviklin-



Figur 3.12: Spektre for AB 11t og SMA 4+8 på Kastrupvej i år 0 (øverst) og i år 7 (nederst) for personbiler ved 50 km/t.



Figur 3.13:
Resultater fra SPB-målinger på SMA 4+8 slidlaget samt reference-slidlaget AB 11t på M68 for personbiler ved 90 km/t. Der er indlagt lineære regressionslinjer. Desuden vises det tilsvarende SRS-referenceniveau.

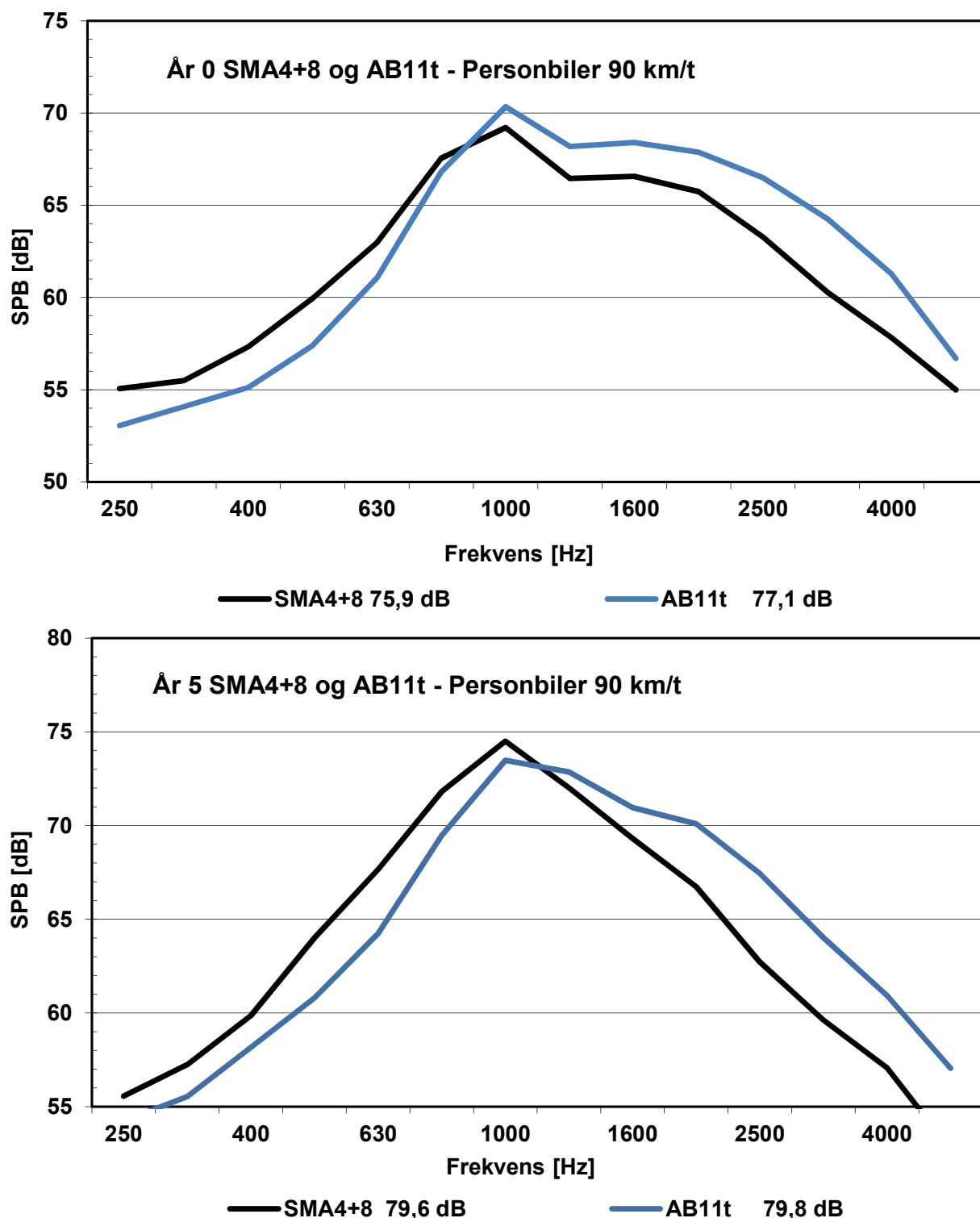


Figur 3.14:
Spektre for SMA 4+8 slidlaget på M68 for personbiler ved 90 km/t for hvert år.

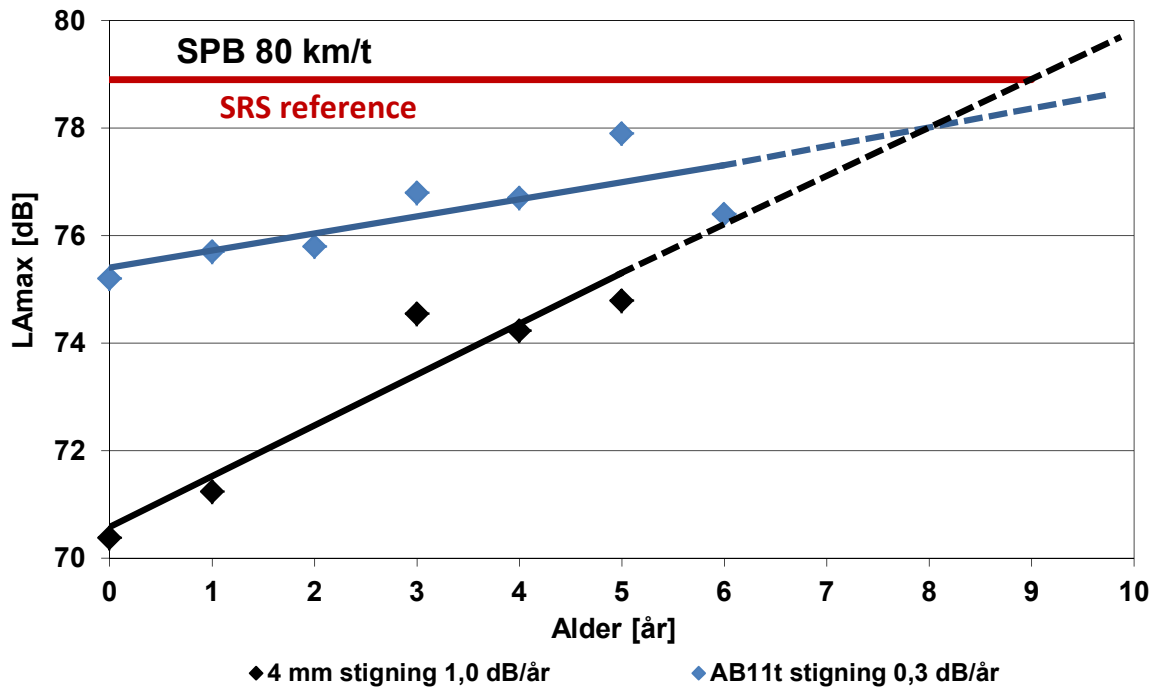
gen over årene er i store træk den samme som for de tre øvrige slidlag med 4 mm sten, der er præsenteret i det foregående.

I figur 3.18 sammenlignes spektrene for AB 11t-referencslidlaget med slidlaget med 4 mm skærver da de var nye og efter fire år. Da slidlagene er nye, er niveauet ens

for frekvenser under 800 Hz. For frekvenser over 800 Hz ligger slidlaget med 4 mm skærver 5 til 10 dB under AB 11t-referencslidlaget. Dette indikerer både, at det optimerede slidlag har mere jævn overfladetekstur, samt at det har en markant mere åben overfladestruktur, som kan dæmpe den højfrekvente luftpumpe-genererede støj. Det ligner frekvensspektret for en drænasfalt-type.

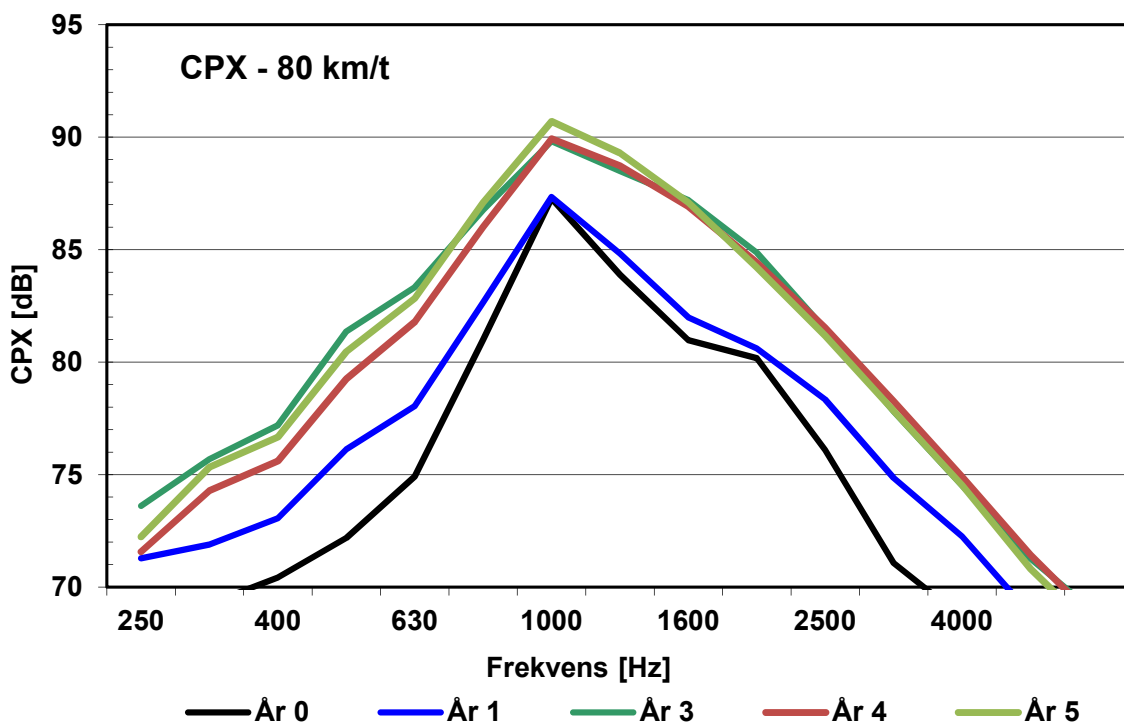


Figur 3.15: Spektre for AB 11t og SMA 4+8 på M68 i år 0 (øverst) og i år 5 (nederst) for personbiler ved 90 km/t.



Figur 3.16:

Resultater udtrykt SPB niveauer fra målinger på slidlaget med 4 mm skærver samt reference-slidlaget AB 11t på M68 for personbiler ved 80 km/t. Der er indlagt lineære regressionslinjer og disse er ekstrapoleret lineært til år 9. Desuden vises det tilsvarende SRS-referenceniveau.



Figur 3.17:

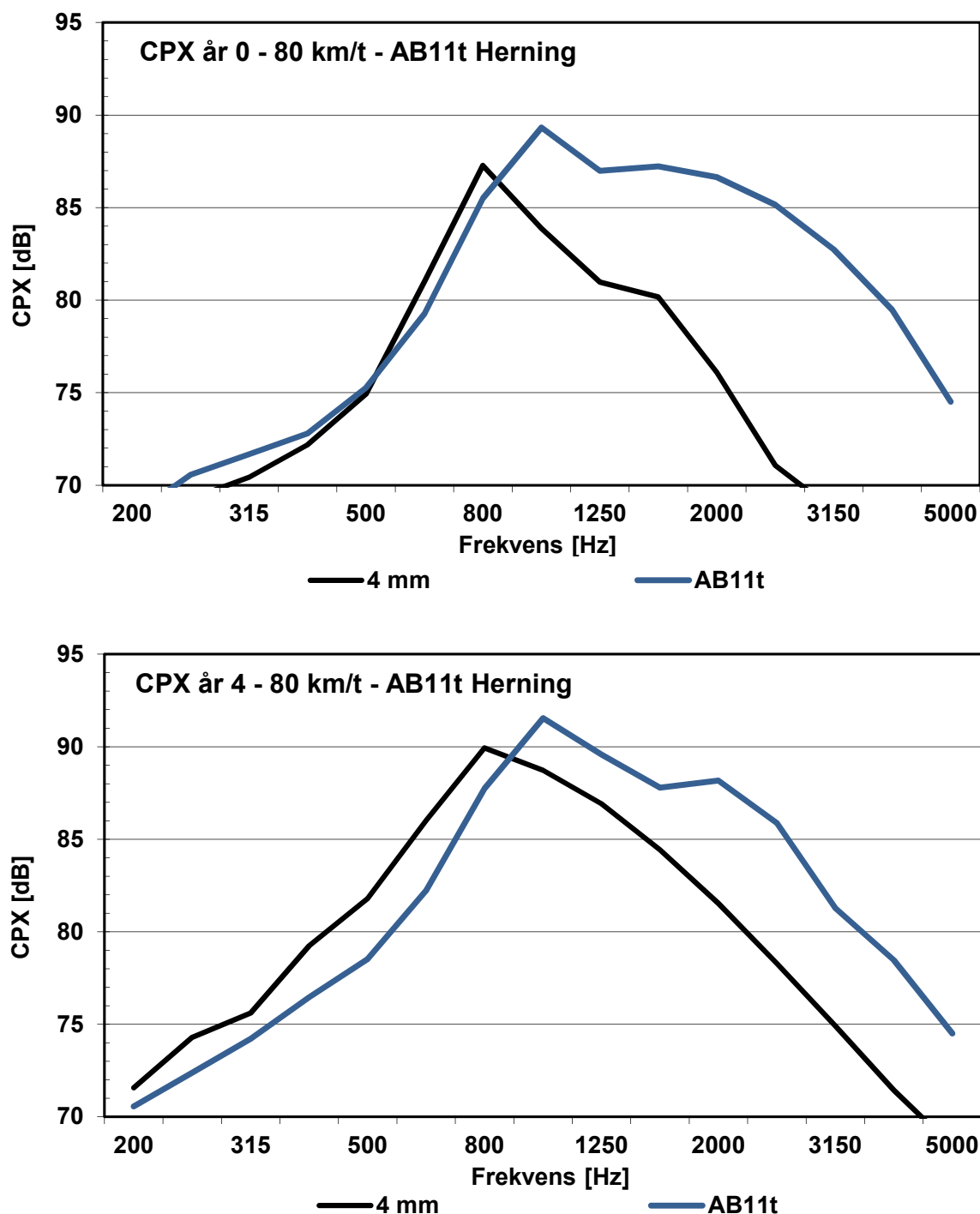
CPX-spektre for slidlaget med 4 mm skærver for personbiler ved 80 km/t for hvert år.

Efter fire år ændres dette billede noget. Slidlaget med 4 mm skærver ligger nu omkring 2 dB over AB 11t under 800 Hz, hvilket indikerer at det har fået en mere ru og ujævn overfladetekstur, som forøger den vibrationsgenererede støj. I det højfrekvente område ligger slidlaget med 4 mm skærver nu blot 3 til 6 dB lavere end AB 11t. Dette indikerer, at den luftpumpe-genererede støj er ste-

get markant, fordi slidlaget ikke er så åbent længere. Hvis der er tale om en drænasfalt, så indikerer det at de åbne porer i slidlaget blevet tilstoppet i en vis grad.

3.6 Sammenfatning af resultater for slidlag med 4 mm sten

Hovedresultaterne fra støjmålingerne på de fire slidlag



Figur 3.18:

CPX-spektre for AB 11t og slidlaget med 4 mm skærver i år 0 (øverst) og i år 4 (nederst) for personbiler ved 80 km/t.

med 4 mm maksimal stenstørrelse er sammenfattet i tabel 3.3. I forhold til SRS klassificeringen falder slidlagene i tre grupper:

- SMA 4 på Kastrupvej som netop ikke opnåede nogen klassificering.
- SMA 4+8 både på Kastrupvej og M68 som opnåede en "SRS standard"-klassificering
- Slidlaget med 4 mm skærver som opnåede en "SRS speciel"-klassificering.

Scanning turen indikerede, at der i Europa findes en type støjoptimerede slidlag med 4 mm sten og denne under-

søgelse viser slidlaget med 4 mm skærver, der falder i SRS speciel-klassificeringen, må anses for at være af en sådan type. De spektrale analyser indikerer, at dette slidlag, som nyt, har en meget jævn overfladetekstur, der reducerer den vibrationsgenererede støj samt at det har en meget åben overfladestruktur, som markant reducerer den luftpumpe-genererede støj – endda så meget, at slidlaget formodentlig har en åben porestruktur i hele slidlagstykkelsen som en drænasfalt-type. Den årlige stigning af støjen ligger på 1,0 dB, hvilket er markant mere end de 0,5 til 0,7 dB/år, der normalt observeres for åbne tynde slidlag [17]. Den markant høje stigning skyldes formodentlig, at den åbne porestruktur tilstoppes over de første år af slidlagets levetid samt at belægningsoverfladen bliver mere ru, hvilket bl.a. kan skyldes et begyndende stentab.

Slidlag	Reduktion i forhold til AB 11t år 0 [dB]	Reduktion i forhold til SRS reference år 0 [dB]	SRS klassifikation	Stigning pr. år [dB/år]	År niveauet når AB 11t [år]	År niveauet når SRS reference [år]
AB 11t Reference	-	-	-	0,2 - 0,3	-	8 - 10
SMA 4 Kastrupvej	1,6	3,7	Ingen	0,5	5	7
SMA 4+8 Kastrupvej	2,9	5,0	SRS standard	0,8	4	5½
SMA 4+8 M68	1,2	4,9	SRS standard	0,9	3	6
4 mm	4,8	8,5	SRS speciel	1,0	8	9

Tabel 3.3:

Sammenfatning af støjreduktion og udvikling for de fire belægninger med 4 mm sten.

4. Strukturanalyse med tynd- og planslib på støjreducerende tynde slidlag

4.1 Baggrund

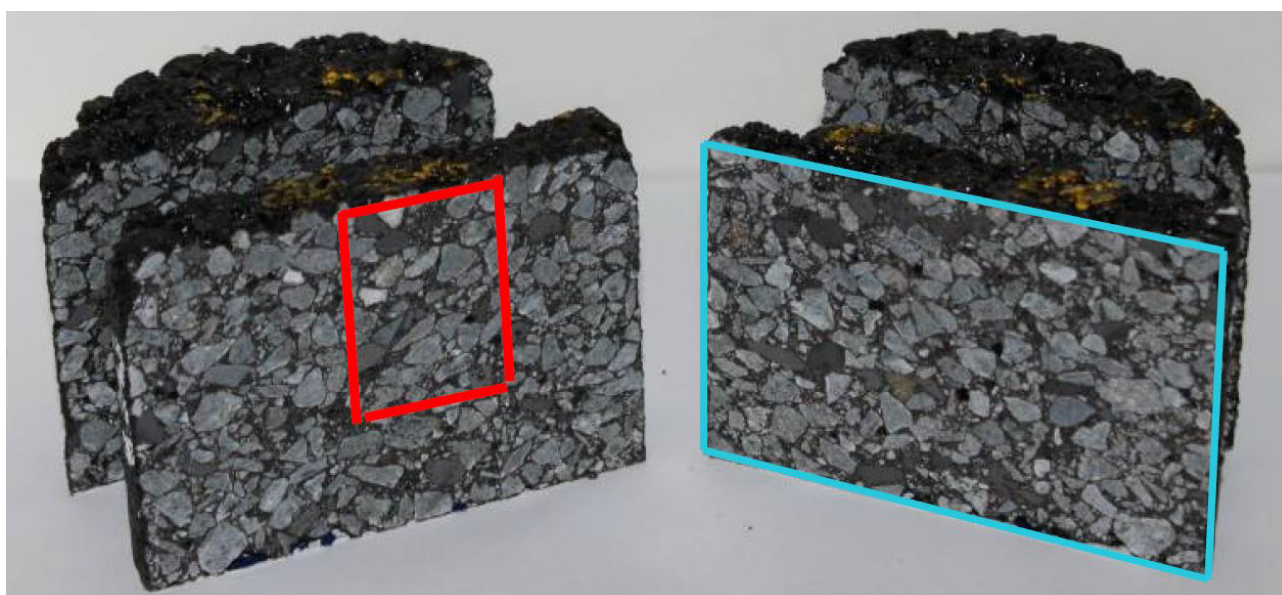
Vejdirektoratet har gennem de sidste ca. 10 år foretaget vurdering med tynd- og planslib på forskellige belægningstyper, som enten er eller kan ses i relation til støjreducerende, tynde slidlag.

Erfaringerne har været samlet i forbindelse med forsøgsstrækninger i forskellige projekter. I flere tilfælde er forsøgsstrækninger, som er blevet "født" under et projekt, blevet fulgt op over flere år under efterfølgende beslægtede aktiviteter. Derfor er det ofte hensigtsmæssigt at

År/Udlægningsår	Lokalitet	Oprindelig projekt tilknytning
1999	Øster Søgade – 2 lags drænasfalt	VD-projekt, SILVIA, SILENCE og IPG
2003	Kongelundsvej, Amager	SILVIA, VD-projekt
2004	M10 ved Solrød	VD-projekt
2005	7 hollandske drænasfaltstrækninger (0-12 år gamle belægninger)	IPG RAVE
2006	Herning I – M64 / Landevej 422	IPG THIN
2007	Kastrupvej	SILENCE, VD-projekt
2008	Herning II – M68 Messemotorvejen	VD-projekt
2010	Igelsø – Landevej 145	VD-projekt
2012	Stensved – Landevej 619	COOEE
2013	Svendborg – Johs. Jørgensens Vej Langeskov – Maegyden	COOEE

Tabel 4.1:

Kronologisk liste over forsøgsstrækninger med støjreducerende belægninger, hvor der er potentiel mulighed for rapportering af tynd- og planslib.



Figur 4.1:

Eksempel på Marshall-prøvelegeme med udskæringer parallelt med et plan gennem prøvens akse til senere præparering af et tyndslib (rød firkant) og et planslib (blå firkant).

angive demonstrations-forsøgsstrækningens lokalitet som den primære reference, da de tilknyttede, overordnede projektnavne, som har bidraget til deres udførelse, enten let kan blive blandet sammen, eller måske ikke står så skarpt i erindringen.

Det er dog langt fra i alle tilfælde, at der er blevet opboret kerner af belægningerne til produktion og analyse af tynd- og planslib. Det skyldes flere forhold, hvor kapacitet og en ofte tilstedeværende "uvilje" til at opbore kerner i belægninger, som gerne i mange år skulle kunne være genstand for opfølgende målinger, er blandt de vigtigste. Borekerner i hjulsporene er specielt interessante, da de også afspejler den tekstur, som er kontaktflade for dæk/vejbane-støjen. Desværre vil reparationer efter udtagne kerner være lige i køresporet for senere CPX-målinger med Vejdirektoratets støjmåletrailer deciBella. Det kan på sigt i yderste konsekvens give årsag til påvirkning af måleresultatet. I nogle tilfælde har der i forbindelse med etablering af forsøgsstrækninger været produceret prøveplader af det pågældende vejmateriale i forbindelse med udlægningen. Kerner fra sådanne prøveplader har været anvendt til tynd- og planslib-analyser.

Bruttolisten af prøvestrækninger, hvorfra tynd- og planslib potentielt kunne forventes at være til rådighed ses i tabel 4.1. Tabellen indeholder samtidig en reference til de projekter (egne eller internationale), som de pågældende prøvestrækninger relaterer sig til, og hvor der eventuelt kan hentes yderligere information.

4.2 Analyse med tynd- og planslib

Strukturanalyse på asfaltprøver

De to beslægtede teknikker, der anvendes her, omtales ofte under ét som tynd- og planslib, da begge teknikker næsten altid udføres samtidig og denne rækkefølge forekommer mest mundret. Egentligt burde rækkefølgen mere logisk være plan- og tyndslib, da planslibet giver mulighed for analyse af den overordnede struktur i belægningsprøven (f.eks. hulrumsfordeling, tekstur i overflade mv. under ultraviolet lys (UV-lys)) enten med det

blotte øje eller med et pålys-mikroskop i svag opløsning.

Tyndslibet går derimod ned i detaljen med vurdering af:

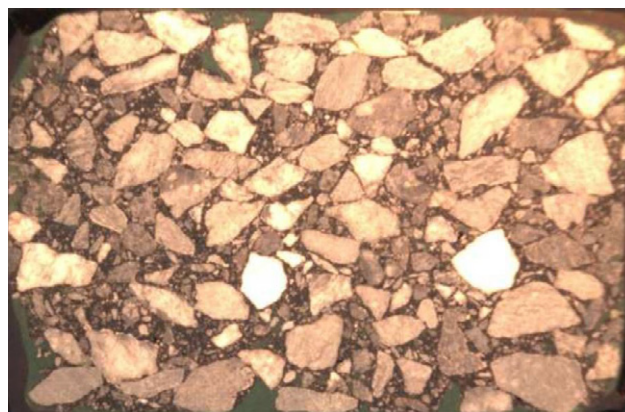
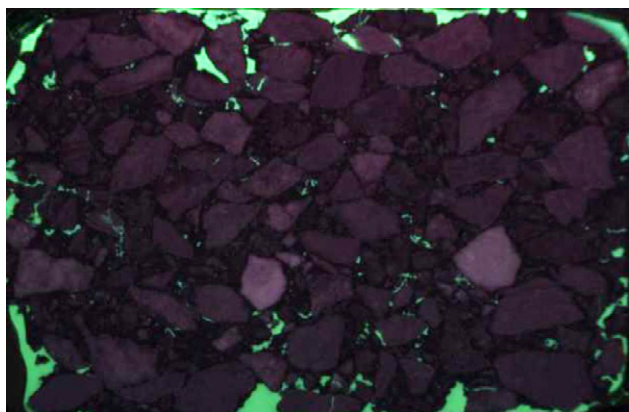
- mørtelsammensætning,
- vedhæftning mellem sten og bindemiddel,
- eventuel tilstedeværelse af fiber-klumper (cellulose-fibre),
- eventuel tilstedeværelse af smuds i materialets hulrum (eksempelvis vigtigt ved drænasfalt),
- evaluering af en eventuel polymertilsætning (fluorescerende effekt),
- geologisk identifikation af stenmaterialerne (f.eks. ved hjælp af krydsede Nicolls-prismer, der polariseres lyset, hvilket giver ekstra analysemuligheder for krystallinske materialer).

Her anvendes et mikroskop med forstørrelser på typisk 25 eller 100 gange, som betyder at billedokumentation fra tyndslib gerne dækker et detailudsnit af prøven med et areal på henholdsvis ca. 3,2 mm x 4,1 mm eller ca. 0,8 mm x 1,1 mm. Der anvendes et gennemlysningsmikroskop ved almindelige tyndslib, mens et pålys-mikroskop anvendes, hvis der er tale om en undersøgelse af polymerer.

Fremstillingsteknikkerne beskrives meget kort i de følgende afsnit med udgangspunkt i figur 4.1.

Planslib

Planslib fremstilles af borekerner normalt med en diameter på ca. 100 mm og højden af slibet udgøres af højden på laget (lagene) eller af hele kernen. Slibet udskæres vinkelret på kerneoverfladen og ned i prøven. Et eksempel er vist i figur 4.1. I nyere tid, hvor trafikens påvirkning af lejringen af de større korn i overfladen også er begyndt



Figur 4.2:

Eksempel på planslib af indstampet Marshall-legeme af skærvemastiks. Hvert billedfelt viser ca. 101 mm x 65 mm. Til venstre prøven set i ultraviolet lys (UV) og til højre i stærkt hvidt lys.

at indgå i vurderingen af dæk/vejbane-interaktion, kan der også ved udskæringen tages højde for orienteringen af trafikens kørselsretning i forhold til slibets orientering (parallelt med trafikken eller vinkelret på). Det kan specielt være vigtigt i opboringer i belægningernes kørespor. Dette ekstra vurderingselement fordrer, at der allerede før opboringen er sket en mærkning af prøven til fastlæggelse af dette forhold, da prøven som følge af opboring sædvanligvis kommer til at rotere frit i borerøret i opborings sidste fase.

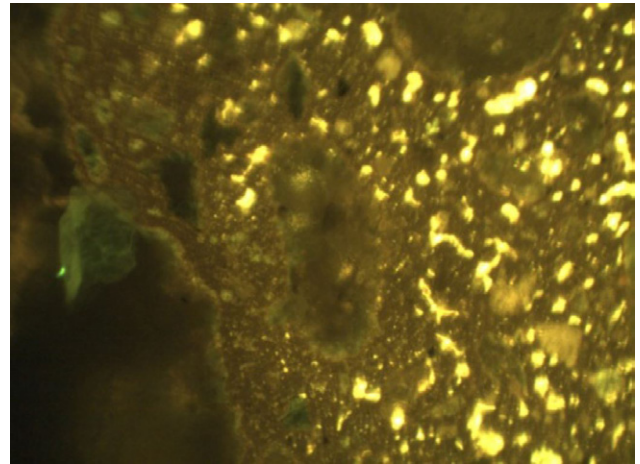
Den skårne prøve renses og tørres. Herefter imprægneres prøvens snitflade under vakuum med epoxy, som udfylder hulrum og evt. andre porøsister. Den anvendte epoxy skal indeholde fluorescerende farve, hvis det er et almindeligt slib, mens det skal være en ren epoxy, hvis polymerer skal undersøges, da disse også har en fluorescerende effekt i UV-lys. Herefter slibes den imprægnerede prøve under vandkøling til det færdige resultat, som nu er klar til vurdering i en kombination af normalt lys og UV-lys.

UV-lys vil sædvanligvis efterlade stenoverflader og den bituminøse mørtel som relativt mørke områder, hvilket letter vurderingen af hulrumsstrukturen, som er udfyldt med den fluorescerende grønne epoxy. Hvis planslibet vurderes i skarpt hvidt lys, fremmer det den visuelle vurdering af den rumlige fordeling af mørtel og mineralkorn tillige med de forskellige typer af mineralkorn, hvis flere geologiske kilder indgår i asfalten.

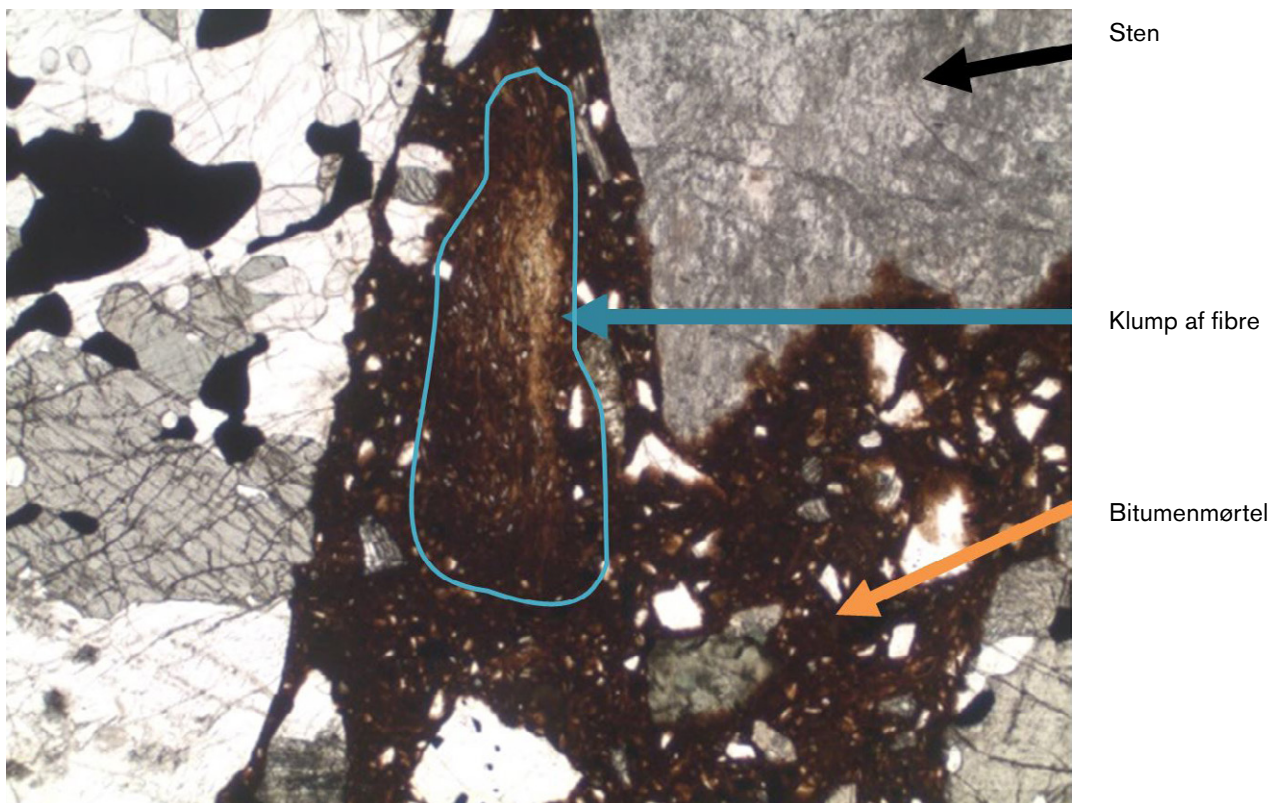
Tyndslib

Tyndslibet fremstilles typisk ved et snit vinkelret fra overfladen af vejen, således at man opnår at have ca. 30 mm af overfladen til et standardslib (se figur 4.1).

Hvis man især er interesseret i analyse af polymerer i prøvens bindemiddel, så laves et såkaldt "polymerslib", hvilket betyder, at den benyttede epoxy ikke indeholder fluorescerende materiale. Derved kan man så evaluere det eventuelt fluorescerende respons fra polymeren, hvil-



Figur 4.3: Eksempel på polymerslib. Arealet er ca. 0,8 mm x 1,1 mm. De gule pletter er SBS polymer; enten i form af "overskud" eller dårligt dispergeret materiale.



Figur 4.4: Eksempel på tilstedeværelse af stor klump af cellulosefibre i en skærvemastiks. Areal af foto er ca. 3,2 mm x 4,1 mm.

Udlægningsår	Lokalitet	Udtagningsår	Tynd- og planslib Udført/projektrapport
1999	Øster Søgade – 2 lags drænasfalt	1999, 2000, 2003, 2005 og 2007	Ja/Ja [21]
2003	Kongelundsvej, Amager	Nov. 2008	Ja/Ja [22]
2005	7 hollandske drænasfaltstrækninger (0-12 år gamle belægninger)	0-12 år gamle i 2004	Ja/Ja [23]
2008	Herning II – M68 Messemotorvejen	2008	Ja/Ja [24]
2012	Stensved – Landevej 619	2012	Ja/på vej [25]
2013	Svendborg – Johs. Jørgensens Vej Langeskov – Maegyden	2013	Ja/på vej [26]

Tabel 4.2:

Kronologisk liste over forsøgsstrækninger med støjreducerende belægninger med tynd- og planslib.

ket bl.a. forekommer tydeligt ved SBS (Styren-Butadien-Styren), som er en af de mest anvendte polymerer til modificering af bitumen. Ved polymerslib undersøges ofte en lidt større dybde fra overflade (måske 45 mm), hvilket giver bedre mulighed for at vurdere polymerfordelingen på tværs af en tyndt slidlag. Det er specielt vigtigt ved belægningstypen TB k, hvor teknikken kan bruges til at se optrængningen af den polymermodificerede, ubrudte emulsion i asfaltslidlaget, som sædvanligvis fremstilles med almindelig, umodificeret bitumen.

De epoxyimpregnerede prøver slibes først fra den ene side, renses og monteres på et kraftigt objektglas. Herefter slibes der fra prøvens anden side, indtil en tykkelse på ca. 20 µm opnås, hvorefter præparatet renses og beskyttes med et dækglass, og er nu klar til den visuelle vurdering. Ved fremstilling af tyndslib til undersøgelse af polymeren anvendes ikke dækglass.

4.3 Udførte undersøgelser med tynd- og planslib

På baggrund af bruttolisten i tabel 4.1 er der lavet en sektion herfra med hensyn til udførte tynd- og planslib. I den sammenhæng er udtagningsstidspunktet også meget væsentligt. Primært er der ofte tale om fastlæggelse af udseende af initial-situation kort efter udlægning, så de pågældende belægningsprøver er udtaget samtidig med den almindelige komprimerings- og kvalitetskontrol. I andre tilfælde er det sket som en separat opfølgning på et senere tidspunkt; potentielt kunne der også være tale om flere udtagningsår, hvis en udvikling i hulrums-, overflade samt teksturforhold skulle følges. Indenfor de støjreducerende, tynde slidlag er sidstnævnte anvendelse af tynd- og planslib ikke brugt til at følge udviklingen; det er dog benyttet i forbindelse med Øster Søgade-projektet [21] om dobbeltlags drænasfalt, som er fulgt gennem hele belægningens levetid.

I forhold til det aktuelle projekt med fokus på erfaringerne

med støjreducerende, tynde slidlag, så begrænses listen til lokaliteterne på:

- Kongelundsvej, Amager
- M68 Messemotorvejen ved Herning
- Stensved, landevej 619
- Svendborg, Johs. Jørgensens Vej, og
- Langeskov, Maegyden

I det følgende afsnit vil konklusionerne fra tynd- og planslib blive refereret (for de to sidste strækninger i den udtagningsstrækning, som de måtte foreligge). Til sidst vil der blive evalueret om eventuelle tværgående konklusioner kan drages på det foreliggende (muligvis med supplerende erfaringer fra undersøgelser fra andre belægningstyper). Vejdirektoratet anvender en nummerering af alle prøver. Disse numre anvendes i det følgende som en entydig identifikation af de enkelte prøver.

4.4 Ekstrakt af konklusioner Kongelundsvej

Forsøgsstrækningerne i Københavns kommune på Kongelundsvej (lige syd for Amagermotorvejen) omfatter tre støjreducerende slidlag (SMA 6+, AB 6å og TB 6k) samt en reference (AB 11t). I perioden mellem udlægningen i 2003 og udtagningen af prøverne i 2008 er der sket en omlægning af vejens geometri (etablering af en "midter-rabat" med indfarvet overfladebehandling). De fire prøver fra hver af de forskellige belægninger er optaget fordelt (Højre Hjulspor, Mellem Hjulspor, Venstre Hjulspor) over kørebanens tværsnit i 2008. Derfor kan der ikke siges noget mere specifikt om indflydelsen af en eventuel efterkomprimering fra trafikens side, da positionerne i forhold til et tidligere køremønster og vægtningen til det nuværende er ukendt.

SMA 6+ (SV 08264-267)

Planslibene viser, at der kan ses en varierende lagtykkelse af SMA 6+ laget. Der ses tykkelse fra ca. 17 mm til 26 mm. Under slidlaget findes et bærelag, der kan beskrives som et GAB II lag. Dette lag er meget tyndt ca. 9 mm under en af kernerne.

Tyndslibene viser, at slidlaget er ensartet og ser åbent ud. Der kan ses tykke bindemiddelhinder omkring stene, men enkelte steder ses også "rene" stenoverflader. I den øverste del af slibet ses "snags" i porerne. I selve mørtelfasen (fint stenmateriale og bindemiddel) ses enkelte steder i flere slib klumper af fibre, der ikke er blevet "revet" i stykker under blandingen på værket.

Den nederste del af slibet (laget under SMA 6+) virker åbent, og der er flere områder med rene stenoverflader. Stenmaterialet består af blandet materiale indeholdende fossiler (indikerer grus oprindelse).

AB 11t (SV 08268-271)

Planslibene af referencestrækningen med AB 11t viser en belægning, som selvfølgelig er tættere end SMA 6+. Der ses varierende opbygning af belægningen på de udtagne kerner, og der kan også konstateres meget varierende lagtykkelser af AB 11t og de øvrige lag. For eksempel ses AB 11t laget at variere fra 23 mm til 32 mm.

I tyndslibene af referencestrækningen ses mange områder med "rene" stenoverflader. Dette gælder også for den øverste del af slibet. Stenmaterialet virker meget uensartet; der ses mange fossiler og porøse sten i slibene i særdeleshed for laget under slidlaget. I et af slibene kan der også konstateres vandfortrængning.

AB 6 å med P-Flex (SV 08272-275)

Planslibene viser, at slidlaget (AB 6å) selvfølgelig er åbent. Laget varierer meget lidt (16 til 21 mm). Bærelagsdelen kan beskrives som varierende, da den i nogle kerner ser ud til at være i orden og i andre ser åben ud.

I øverste lag i disse tyndslib ses nogle områder med "rene" stenoverflader; ellers giver det indtryk af at være tilfredsstillende (efter fem års udlægning). Laget beskrives som åbent, men det er forventeligt, da det er typen AB 6å. Det nederste lag (bærelaget) af alle slibene fra denne strækning er noget varierende, da der i nogle områder er pæne bindemiddelhinder omkring stenene, mens andre steder er rene sten.

TB 6k (SV 08276-279)

Planslibene af disse kerner viser, at slidlaget er åbent i en af prøverne, mens de tre øvrige er tættere. Lagtykkelsen af laget varierer meget lidt, da det er opmålt til enten 11 eller 12 mm.

Tyndslibene viser, at TB 6k laget er noget åbent i toppen, og der ses områder med rene stenoverflader og klumper af fibre, der ikke er "slået" op under blandingen.

Under TB 6k laget ses i alle slibene et meget åbent lag på ca. 10 mm. Laget har generelt problemer med, at der er mange områder med manglende bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. Under dette lag er belægningen meget tæt.

Afsluttende bemærkninger fra Kongelundsvej (2008)

Borekernerne viser en vej med meget varierende opbygning. Tilstanden af belægningerne vurderet på baggrund af tyndslibene viser, at AB 6å og SMA 6+ laget er tilfredsstillende, mens TB 6k og referencestrækningen AB 11t har mange områder, hvor bindemidlet har sluppet stenoverfladen (vandfortrængning). Lagene under slidlaget varierer en del. Dog ses der i de fleste slib et meget åbent lag lige under slidlagene.

4.5 Ekstrakt af konklusioner Herning II

Forsøgsstrækningerne Herning II (udlagt 2008) bygger på erfaringerne fra tidligere forsøg med tynde støjreducerende slidlag, måske især fra Herning I (udlagt 2006), hvor der dog ikke blev udført tynd- og planslib. Forsøgsstrækningerne i Herning II befinder sig på M68 Messe-motorvejen mellem Vardevej og Snebjerg. Slidlaget på den resterende del af strækningen mellem Vardevej og Snebjerg udgøres af en SMA 6+ SR, som også indgår i undersøgelsen.

Udover tynd- og planslib er der for to af belægningerne også udført polymerslib. I modsætning til Kongelundsvej er der ved Herning II kun opboret én kerne af hvert materiale, hvilket til dels skyldes det store antal belægningsvarianter. I alt omfatter Herning II seks støjreducerende tynde slidlag med to referencer (AB 11t og SMA 6+ SR).

De efterfølgende afsnit indeholder en beskrivelse af plan- og tyndslibet. Det skal bemærkes, at beskrivelserne af plan- og tyndslib er foretaget uafhængig af hinanden, hvorfor der i beskrivelsen af planslibet kan stå, at slibet virker åbent, mens tyndslibet kan angives som værende tæt. Dette skyldes, at beskrivelsen af tyndslibene fortrinsvis betragter mørtelfasen (bindemiddel og mindre stenmateriale).

SMA 6+ (5/8) (SV 09057)

Planslibet for SMA 6+ (5/8) ser meget åbent ud i forhold til, at det er en SMA. Da det er en SMA, der er optimeret for at reducere støjen, er det forventeligt at hulrummet er højt. I binderlaget ses nogle store hulrum, men ellers er laget tæt.

Tyndslibet viser, at det øverste lag er lidt åbent, og der kan konstateres tykke bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. Der ses dog enkelte klumper af fibre, som ikke er blevet "revet" i stykker under blandingen. Yderligere kan der i den øverste del af tyndslibet ses knust stenmateriale. Disse sten er knust under komprimeringen eller af trafikken, da der ikke ses indtrængning af bindemiddel i revnen.

Sammenhængen mellem slidlag og binderlag kan beskrives som god.

Binderlaget kan beskrives som tæt, og der ses pæne bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. I et enkelt punkt ses knust stenmateriale.

SMA 6+ (8/11) (SV 09058)

Planslibene af SMA 6+ (8/11) er lidt mindre åbent end i SMA 6+ (5/8); dog er den stadig mere åben end en SMA, der ikke er optimeret for at reducere støjen. Binderlaget virker tæt som en ABB.

Der ses tykke bindemiddelhinder omkring stenene i slidlaget på denne prøve, og der er også en del snavs i hulrummene et stykke nede i slidlaget. I denne prøve kan der også konstateres en sten, som er blevet knust efter blandingen. Det er også i denne prøve muligt at se klæbningen mellem slidlag og binderlag. Beskrivelsen af binderlaget svarer til SV 09057, da dette også ser tæt ud med pæne bindemiddelhinder omkring stenene. Tillige kan der også her ses en knust sten.

SMA 4+ (5/8) (SV 09059)

Det fremstillede planslib af prøven viser et meget åbent og ensartet slidlag SMA 4+ (5/8), og et tæt binderlag.

Tyndslibet viser, at slidlaget har tykke bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. Der ses et område med en klump af fibre, som ikke er blevet slået op under blandingen. I hulrummene ses snavs så langt nede i belægningen som ca. 20 mm. Som i de to tidligere beskrevne prøver ses der god sammenhæng mellem slidlag og binderlag.

Binderlaget virker tæt; der ses dog et enkelt område, hvor man kan konstatere rene stenoverflader.

Optimerede recepter i forhold til tidligere erfaringer

De tre næste materialenavne indledes med ordet "Super" efterfulgt af det generiske navn for materialetypen. Navnene er sat i citationstegn, da betegnelsen dækker over, at der i forhold til vejregelstandardmaterialet (dvs. AB 6å, DA 6 eller DA 8) er foretaget en yderligere optimering af recepten, så den ikke længere er helt i overensstemmelse med vejregelkravene på det pågældende tidspunkt. Den generiske asfalttype indikerer den asfaltfamilie, der har været udgangspunkt for den pågældende optimering med hensyn til støjreducerende egenskaber.

"Super AB 6å" (SV 09060)

Planslibet viser et meget åbent slidlag, men også et meget åbent binderlag. Dette kan med tiden give problemer med holdbarheden, da vand formodentlig har mulighed for at trænge et godt stykke ned i belægningen. Det skal dog bemærkes, at denne kommentar sker på baggrund af et enkelt planslib, og denne beskrivelse måske ikke er repræsentativ for hele denne del strækning.

Tyndslibet viser et slidlag, som har tykke bindemiddelhinder. I overfladen at slibet ses en knust sten. Mellem slidlag og binderlag kan der konstateres en stor mængde emulsion og god vedhæftning mellem de to lag. I binderlaget ses en tæt mørtel, og i et hulrum er der en del løst materiale (snavs).

Polymerslibet viser, at polymeren i slidlaget er meget jævnt fordelt, og der ses kun enkelte områder i bindemiddelfasen, hvor der ikke er polymer. I klæbelaget, der også skulle indeholde polymer, er denne fuldstændig dispergeret.

"Super DA 6" (SV 09061)

Som forventet ses det, at planslibet fra denne prøve et meget åbent slidlag, da dette er en drænasfalt. Binderlaget er tæt.

Som for de øvrige materialer ses der tykke bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. Da det er en drænasfalt, er hulrummene store, hvilket specielt ses nederst i laget mod det underliggende binderlag. Der ses god vedhæftning mellem slidlaget og binderlaget i form af et tykt lag af bindemiddel. Igen kan der registreres en knust sten i overfladen. I binderlaget ses en tæt mørtelmasse, men også et enkelt område, hvor der kan konstateres rene stenoverflader.

"Super DA 8" (SV 09062)

Dette planslib viser også en meget åbent slidlag, som er endnu en drænasfalt. Hulrummene er dog en del større end for den foregående prøve, da dette er en drænasfalt med maksimal kornstørrelse på 8 mm, mens den foregående havde en maksimal kornstørrelse på 6 mm. Laget under slidlaget er tæt. Her ses meget tykke bindemiddelhinder omkring stenene i slidlaget. Der ses også her en knust sten, men bindemidlet er her trængt ind i revnerne, hvorfor stenen er knust før eller under blandingen.

Mellem slidlag og binderlag ses et tykt lag klæber. I binderlaget ses en tæt mørtelfase og få hulrum.

SMA 6+ SR (ref.) (SV 09063)

Denne prøve er ved sammenligning med de øvrige planslib tættere, selvom dette lag også skulle være optimeret med hensyn til støjreduktion. Som for de fleste øvrige binderlag i denne prøveserie er dette tæt.

Tyndslibet viser, at der i slidlaget er tykke bindemiddelhinder omkring stenmaterialet. Som i alle de tidligere slidlag ses der knuste sten, hvor knusningen er sket efter blandingen, da der ikke er bindemiddel trængt ind i revnen. Vedhæftningen mellem binderlag og slidlag er god, der ses et tykt lag klæbning.

Binderlaget kan beskrives som tæt, men med inhomogen mørtel. Der ses også i binderlaget en knust sten.

Polymer-tyndslibet af denne prøve viser en meget uens-

artet dispergering af polymeren i slidlaget

Der ses områder, hvor der næsten ikke er noget polymer (eller virkelig godt dispergeret) og områder, hvor der er sammenklumpning af polymer. Polymeren er i binderlaget meget ensartet og ligner binderlaget i prøven fra Super AB 6å (SV 09060).

AB 11t (ref.) (SV 09064)

Planslibet af denne prøve viser, at både slidlaget og binderlaget er meget tæt. Slidlaget skal også være tæt, da det er en AB 11t, der ofte bruges som referencebelægning i forbindelse med støjreducerende demonstrationsstrækninger.

Slidlaget er meget tæt og der kan konstateres pæne bindemiddelhinder omkring stenene. Mellem slidlag og binderlag ses god vedhæftning og et tykt lag af bindemiddel fra klæbningen.

Binderlaget er mere åbent. Der kan ses områder med rene stenoverflader og enkelte knuste sten, men det ser ud til, at der er bindemiddel inde i revnerne på stenmaterialet. Stenene har således formodentlig været revnet (knust) før eller under blandingen i asfaltværket.

Afsluttende bemærkninger fra Herning II

Belægningerne var nye, da borekerne i denne undersøgelse blev udtaget, og der ses ingen særlige problemer. Det kan dog påpeges, at der i alle prøverne af støjreducerende slidlag ses knuste stenmateriale. Det skal også bemærkes, at undersøgelsens vurderinger er baseret på kun en enkelt borekerne.

4.6 Ekstrakt af konklusioner Stensved

COOEE-projektet har som hovedformål at udvikle belægninger med lav rullemodstand, men i de mere detaljerede præmisser for optimeringen indgår, at andre funktionaliteter ikke må tabes i uacceptabel grad. Da de foreløbige kandidater til belægninger med lav rullemodstand (Green Asphalt 6) har 6 mm (alternativ 8 mm) som nominel maksimal kornstørrelse, så forventes der også en vis støjreducerende effekt i forhold til den danske reference (AB 11t/ SMA 11). Derfor er forsøgsbelægningerne fra COOEE-projektet også interessante i sammenhæng med dette projekt om "Optimering af tynde, støjreducerende slidlag".

Der er foretaget opboringer af kerner fra forsøgsstrækningen ved Stensved (Landevej 619) af belægningsmaterialerne Green Asphalt 6 og Green Asphalt 8 kort efter, at de blev udlagt i 2012. Materialerne er produceret på NCC's asfaltfabrik i Maribo med Rønne granit og Aggersund kalkfiller med "in-situ" modificering af bitumen med P-Flex (en SBS-polymer). Tynd- og planslibene er blevet analyseret og resultaterne herfra diskuteret på interne projektmøder januar og maj 2013. Der er endnu ikke udarbejdet nogen specifik rapport for disse tynd- og planslib.

Fra projektmøderne kan følgende tre punkter nævnes vedrørende resultater fra tynd- og planslib:

1. Asfaltmaterialerne er som sagt produceret med Rønne granit som stenmateriale, der også kaldes "Blå Rønne", da stenkornene kan have et let blåligt skær – specielt når de er fugtige. Planslibene viser, at de anvendte stenmaterialer har haft en noget større andel af "røde" korn end forventet, hvilket fremhæves som uønsket. "Røde" korn i "Blå Rønne" er notorisk kendt for at have en dårligere vedhæftning til bindemidlet end de tilsvarende "blå" korn, hvorfor en større mængde er uønsket af hensyn til materialets holdbarhed (vandfortrængning) i så forholdsvis åbent teksturerede materialer som Green Asphalt.
2. Recepten anvender cellulosefibre som støttefibre i belægningsmassen for at fastholde den store bitumenmørtelmængde under transport og udlægning. Cellulosefibre er pelleteret i bitumen, og disse "pellets" tilsættes sammen med stenmaterialet i "tør"-blandingsperioden i batchmixeren. Tyndslibene viser forekomst af fiberklumper, der antyder, at der ikke er opnået en optimal fordeling af disse fibre.
3. Modificeringen med P-Flex sker "in-situ", hvilket betyder, at den pelleterede P-Flex tilsættes i "våd"-blandingsperioden sammen med bitumen, når "tør"-blandingsperioden er færdig. Polymer tyndslibene antyder, at der ikke er opnået en optimal fordeling af polymeren, da der forekommer uens fordelte mængder af fluorescerende materiale i polymer tyndslibene.

Konklusionen fra projektmøderne bliver før produktion af Green Asphalt i Svendborg i 2013 på Fyn (Johs. Jørgensens Vej, Svendborg og Maegyden, Langeskov), at der anvendes et andet stenmateriale (Jelsa), og at der skal eksperimenteres med forlængede blandetider – både for "tør"- og "våd"-blandingsperioderne.

4.7 Ekstrakt af konklusioner Johs. Jørgensens Vej og Maegyden

Der er udført forsøgsstrækninger på to lokaliteter i 2013 med ugers mellemrum under COOEE-projektet, hvis hovedformål er at optimere tynde slidlag med hensyn til rullemodstand uden deres andre egenskaber (herunder støjreduktion) påvirkes i negativ grad. De to lokaliteter er Johs. Jørgensens Vej i Svendborg og Maegyden, som er en kommunevej ved Langeskov. Den første forsøgsstrækning er udover det tidligere nævnte skift i stenmateriale primært benyttet til at vurdere indflydelsen af komprimeringsudstyret (oscillerende kontra vibrerende tromle), idet vejgeometrien ved Johs. Jørgensens Vej i Svendborg ikke muliggjorde optimale målinger af rullemodstanden. Det er de samme to asfaltrecepter, som er benyttet på de to lokaliteter, og materialerne bygger på optimering af recepter af skærvemastiks.

Green Asphalt 6 (SV13729, SV13730, SV13736 og SV13820)

Tyndslibene (SV13729 og SV13730) fra Svendborg indikerer en asfaltblanding, hvor bitumenindholdet i mørtelfasen varierer. Der ses desuden nogle klumper af cellulosefibre og nogle hulrum med indhold af filler og finkornet stenmateriale, hvilket kan antyde mangelfuld blanding og/eller rester af stenmel brugt som slipmiddel under lastvognstransporten. Med hensyn til indflydelse af tromletype må det pointeres at vurderingsmaterialet er meget sparsomt, men der er en indikation af, at strækningen med vibrationstromle har et lidt højere hulrum end strækningen med oscillerende tromle.

Tyndslibene (SV13736 og SV13820) fra Langeskov viser kun få klumper af cellulosefibre og dermed en bedre fordeling af dem i mørtlen. Derimod indikerer en uens størrelsesfordeling af polymer-partiklerne over hele slibene en mangelfuld fordeling af denne tilsætning. Bitumenindholdet er højt, og der er et lavt hulrum, men ligesom slibene fra Svendborg findes der i hulrummene rester af filler og finkornet stenmateriale.

Green Asphalt 8 (SV13731, SV13732, SV13735 og SV13821)

Tyndslibene (SV13731 og SV13732) fra Svendborg viser en god blanding af asfaltkomponenterne, men i nogle områder varierer bindemiddelindholdet i mørtelfasen. Der ses ikke klumper af fibre og polymeren er velfordelt. I modsætning til SMA 6 synes der ikke på dette beskedne datagrundlag at være nogen forskel på, om der er benyttet vibrationstromle eller oscillerende tromle til komprimering.

Tyndslibene (SV13735 og SV13821) fra Langeskov viser et højt bindemiddelindhold, som varierer i mørtelfasen. I modsætning til SMA 6 udviser denne SMA 8 et højere hulrum, hvor nogle af hulrummene er udfyldt med filler og finkornet stenmateriale. Polymeren er veldispergeret, og det synes også at være tilfældet med cellulosefibre, da ingen klumper af fibre kan ses.

Afsluttende bemærkninger fra Johs. Jørgensens Vej, Svendborg

Der er tydeligt forskel – udover maksimalkornstørrelsen – på de to asfaltrecepter udlagt i Svendborg. Der synes at være et problem med at have opnået tilstrækkelig materiale homogenitet i den udførte belægning af Green Asphalt 6. Overordnet set synes der ikke at være en forskel i tekstur og struktur af stenskelettet for de to materialer ved anvendelse af oscillerende eller vibrerende tromle ved komprimeringen.

Afsluttende bemærkninger fra Maegyden, Langeskov

Der er opnået en god homogenitet i de to asfaltmaterialer med hensyn til fordeling af cellulosefibre og polymer for Green Asphalt 6, mens polymerdispergeringen synes inhomogen i prøven af Green Asphalt 8, som også har højere hulrum end Green Asphalt 6. I begge materialer er

der forekomst af filler og finkornet stenmateriale i hulrummene.

Der må til sidst pointeres at det statistiske grundlag for vurderingerne er meget beskedent.

4.8 Diskussion af tynd- og planslibsundersøgelser

Der foreligger ikke systematiske undersøgelser med tynd- og planslib af, om gængse "tør"-blandingstider er tilstrækkelige til at sikre homogene blandinger ved storkornede, stenrige belægningsmasser (SMA 11, SMA 16, DA 11 og DA 16) med hensyn til fordeling/dispergering af tilsætninger. Derfor er der ikke kendskab til, om disse storkornede masser eventuelt har større "indre friktion" og derved sikrer en tilstrækkelig "rivning" af støttefibre indenfor sædvanlige blandetider. Hermed er der ikke nogen dokumentation for et referenceniveau, når blandingsforholdene for finkornede asfaltmasser til støjreducerende, tynde slidlag skal vurderes.

En tværgående konklusion på baggrund af de tidligere omtalte undersøgelser med tynd- og planslib er, at de finkornede, stenrige belægningsmasser ikke ved den traditionelt anvendte "tør"- og "våd"-blandingstid giver tilstrækkelig god fordeling af de tilsatte støttefibre samt polymer, hvis "in-situ" modificering med polymer anvendes. Det vil sige problemstillingen mellem polymermodificeret asfalt eller asfalt med polymermodificeret bitumen.

Blandingseffektivitet/nødvendig tid kan også påvirkes af, om fibre er pelleteret i bitumen eller tilsættes som mindre blokke af sammenpressede fibre. Begge applikationer kan potentielt give problemer. Pelletering med bitumen beskytter fibre mod fugt før anvendelsen, men hindrer/forsinker måske også en homogen fordeling uden betydelig forlængelse (relativt) af blandingsstiderne. Tilsætning af sammenpressede blokke af fibre kræver også ekstra blandetid for at sikre, at blokkene "rives" ud i nærmest de enkelte fibre. Hvis disse blokke har fået fugt (evt. bare fra luften), så kan det være svært til næsten umuligt at få "revet" fibre ud og tørret dem så de under den korte "våd"-blandingstid bliver tilstrækkeligt omhyllet. Hvis dette ikke opnås, er støttefibre ikke effektive mod bitumen-afbinding, og samtidigt kan ikke-omhyllede totter af fibre fremme vandtransport i belægningsmassen lokalt og øge tendensen til lokale belægningsfejl.

Tynd- og planslibene på tværs af undersøgelserne peger også på knusning af stenmaterialet som et ofte forekommende fænomen, der dog kan have flere årsager. Der er ingen tvivl om at trafikken over tid kan have en nedbrydende (knusende) virkning, hvis høje punktbelastninger har forekommet på den lokalitet, hvor lige netop borekernen udtages til undersøgelse. Således findes der i undersøgelsen for Øster Søgade [1] ca. otte år efter udlægning, at der er en forekomst af knuste sten i begge lag af den udlagte to-lags drænasfaltbelægning, hvor knusningen tilskrives trafikken. Undersøgelserne fra Kon-

gelundsvej [2] er også foretaget efter et antal år under trafik (ca. fem år), men her omtales der ikke knusning af stenmaterialet.

Fra Herning II stammer borekernerne fra belægningerne, før de har været udsat for nævneværdig trafik. Vurderingen af slibene viser, at der er fundet flere tilfælde af knuste sten. Tolkningen af årsagen varierer. For typerne "Super AB 6å" og "Super DA 6" er de knuste sten i overfladen, og der er ikke indtrængende bindemiddel i revnen. Det betyder, at de pågældende sten formentlig er blevet komprimeret med en glat valset stålromle, der kan have givet et meget højt kontakttryk. For SMA 6+ SR (ref.) omtales knuste sten i belægningen og ikke i overfladen, hvilket kunne antyde at problemet kunne være for meget brug af vibration under tromlingen.

I "Super DA 8" og AB 11t (ref.) er der i de knuste sten konstateret indtrængende bindemiddel i den fremkomne revne, hvorfor det er mere sandsynligt, at disse revner er opstået under blanding på værket og ikke med komprimeringen.

Disse støjreducerende, tynde slidlag baserer sig på stenrige belægningstyper, som i særlig grad er følsomme for tromleskader, hvis belægningerne tromles med vibrationstromling for længe eller i for kold tilstand. Sidstnævnte er en særlig risiko for de tynde slidlag, som hurtigere afkøles til omgivelserne end de mere traditionelle, tykke slidlag, hvorfor tromleføreren måske for sent får slået vibrationen på tromlen fra. Med forsøgsstrækningerne på Johs. Jørgensens Vej i Svendborg er en eventuel forskel i tekstur/struktur i materialet som følge af at anvende oscillerende tromler i stedet for vibrerende tromler undersøgt. Den foreløbige konklusion ud fra dette forsøg er, at det ikke overordnet set er nogen forskel fra tromletypen, men der er selvfølgelig tale om et enkelt forsøg, hvor også den specifikke receptsammensætning og bearbejdelighed må have en stor indflydelse.

4.9 Konklusion på tynd- og planslibundersøgelser

Tynd- og planslib er en god metode til at foretage en

kvalitativ visuel vurdering af rumlige og materialemæssige spekter af asfaltermaterialer. Belægninger undersøges typisk med udgangspunkt i opborede kerner, som præpareres før tynd- og planslib produceres og vurderes med forskelligt lys med eller uden brug af mikroskop.

På tværs af de foretagne undersøgelser igennem årene på forskellige støjreducerende, tynde slidlag har teknikken indikeret:

- Der benyttes ofte cellulosefibre, som støttefibre i støjreducerende, tynde slidlag af skærvemastiks eller drænasfalt-type. Der konstateres ofte en dårlig rumlig fordeling af disse fibre, som derfor optræder i små klumper. Dette kan måske afhjælpes ved at forlænge blandetiderne på asfaltværket.
- Der findes jævnligt knækkede sten i tyndslibene, hvor den opståede revne ikke er udfyldt med bitumen. Ved nyudlagte veje indikerer dette, at knusningen af stenen er sket som følge af komprimeringen under udlægning; formentlig som følge af brug af vibrationskomprimering på et tidspunkt, hvor den burde være slået fra. Entreprenørerne bør øge deres fokus på dette problem. Tilsyneladende er der ikke nogen forskel i den opnåede komprimering som følge af tromletype (oscillerende kontra vibrerende). Om der er en forskel på tendensen til at "flække" stene ved de to typer, kan datamaterialet ikke afgøre. Hertil er der for få eksempler.
- Forsøgsstrækningerne fra COOEE-projektet peger også på, at der ved meget bitumenrig, tynde støjreducerende slidlag skal være stor fokus på mængden af stenmel, som benyttes som slipmiddel under transport fra asfaltværk til udlægningssted. Forekomst af uomhyllt filler og finkornet stenmateriale i belægningens hulrum er ikke fremmede for holdbarheden. Her spiller også valg af type af lastbilslad og uddannelse af chaufførerne ind.

5. Indkøring og test af nyt udstyr til teksturmålinger

5.1 Baggrund -teksturens indflydelse på dæk/vejbanestøj

En målt vejprofil kan ved Fourieranalyse opdeles i en sum af sinusfunktioner, hvis amplituder kan angives som funktion af en rumlig "frekvens" (amplitudetæthedsspektre). Der benyttes normalt den samme opdeling i oktaver eller 1/3-oktaver som ved akustiske spektre. Den reciprokke værdi af den rumlige frekvens (som måles i m^{-1}) kaldes teksturbølgelængden og måles i m. Hvis amplituden angives som RMS-værdi (Root Mean Square, profilniveau) i dB, benyttes referenceværdien 10^{-6} m. Ud fra teksturbølgelængden opdeles teksturspektret i fire områder:

- ujævnhed ($0,02 - 2 \text{ m}^{-1}$, bølgelængde $50 - 0,5 \text{ m}$)
- megatekstur ($2 - 20 \text{ m}^{-1}$, bølgelængde $0,5 \text{ m} - 0,05 \text{ m}$)
- makrotekstur ($20 - 2000 \text{ m}^{-1}$, bølgelængde $0,05 \text{ m} -$

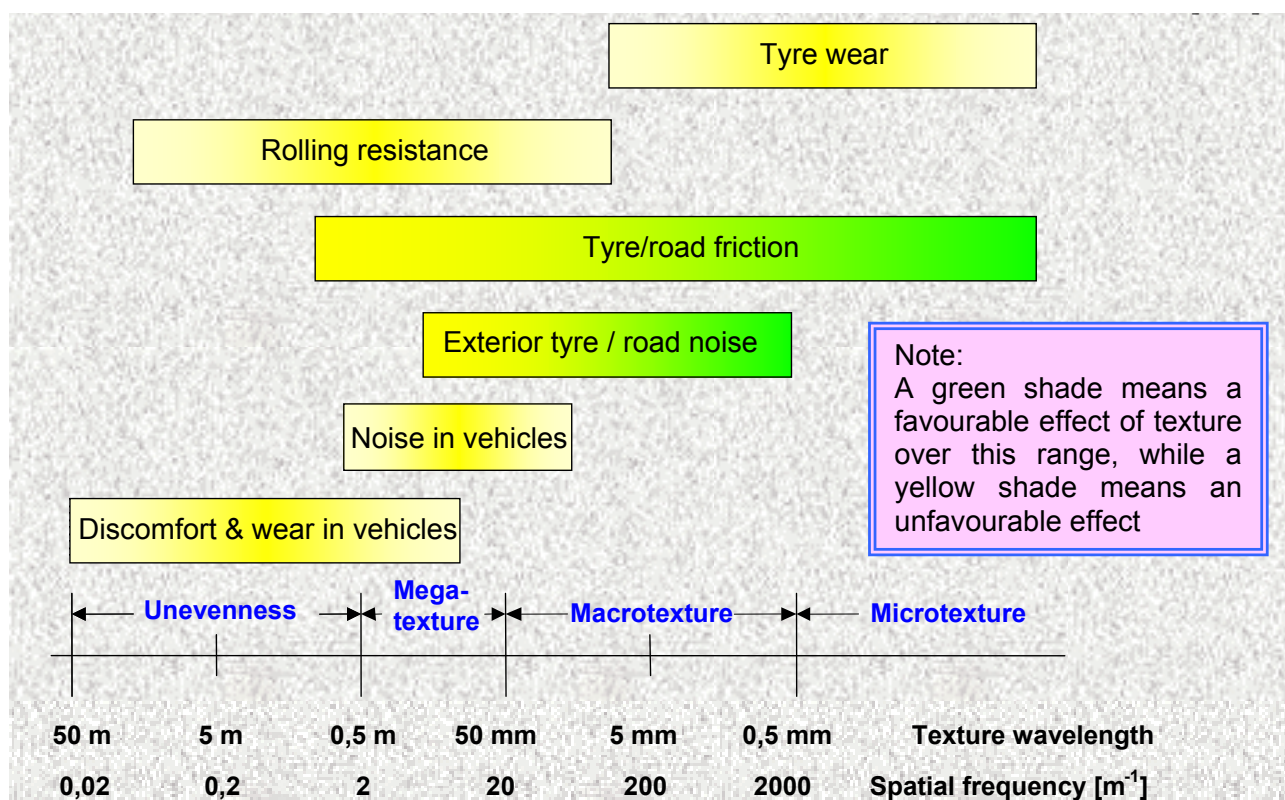
$0,0005 \text{ m}$)

- mikrotekstur ($> 2000 \text{ m}^{-1}$, bølgelængde $< 0,0005 \text{ m}$)

Disse områder og deres væsentligste indflydelse er vist på figur 5.1, mens figur 5.2 viser et eksempel på et 1/3-oktav teksturspektrum. Normale værdier for profilniveauet i makroteksturområdet er $20-80 \text{ dB}$ re 10^{-6} m (svarende til profilniveauer på $0,01 - 0,00001 \text{ m}$).

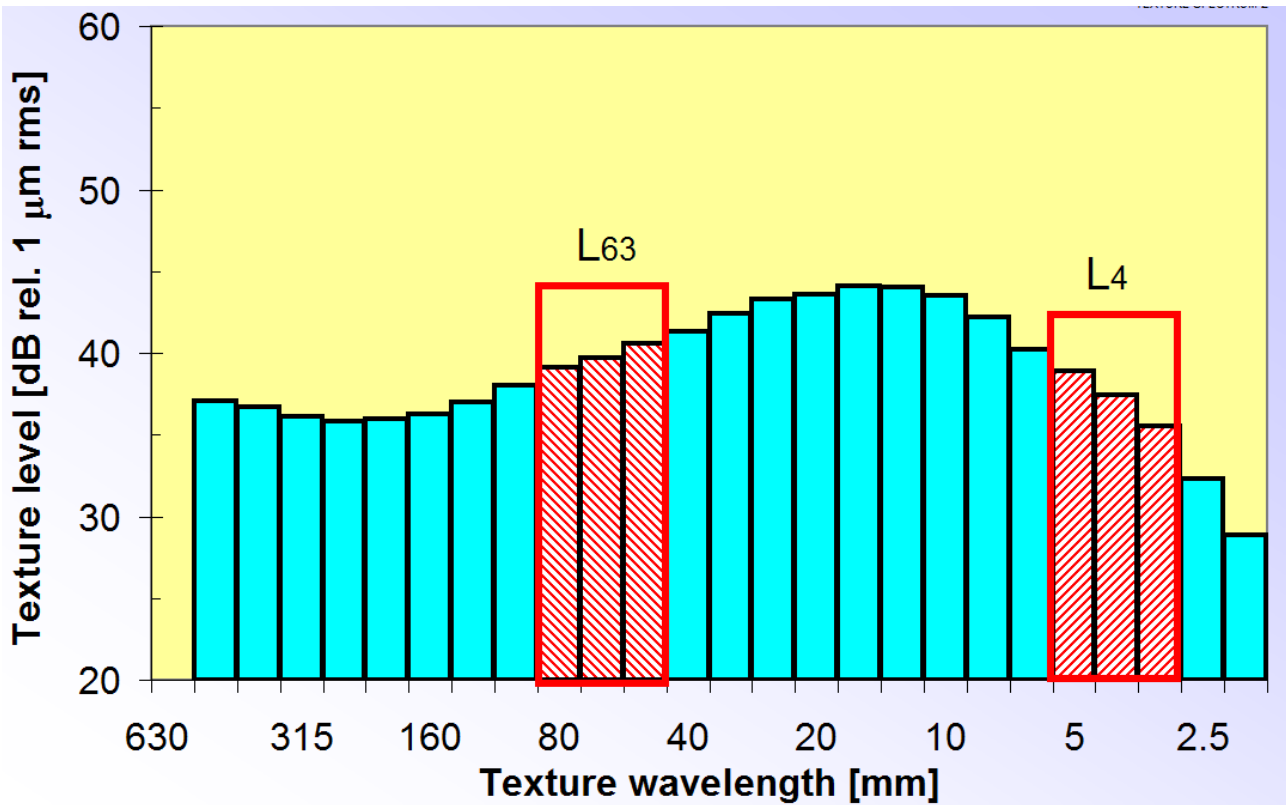
Detaljerede analyser af dæk/vejbanestøj forudsætter måling af 1/3-oktav teksturspektre for den relevante del af vejbelægningen – ved SPB-målinger [46] for en strækning på $\pm 5 - 10 \text{ m}$ omkring måletværsnittet og ved CPX-målinger i samme hjulspor som referencedækkene og på samme tid.

Det har gennem længere tid været forsøgt at etablere sammenhæng mellem et slidlags tekstur og den genere-



Figur 5.1:

Opdeling af teksturprofiler i områder af teksturbølgelængder eller rumlig frekvens, og indflydelsen på forskellige forhold (fra [20] reproduceret med tilladelse af Ulf Sandberg, VTI).



Figur 5.2:

Eksempel på teksturspektrum med angivelse af to områder af teksturbølgelængder, der er vigtige for dæk/vejbanestøj (fra [20] reproduceret med tilladelse af Ulf Sandberg, VTI).

rede dæk/vejbanestøj. Herved kan slidlag, som er støjreducerende, karakteriseres fysisk ved detaljeret måling af overfladeteksturen. Tilsvarende kan en måling af et slidlags tekstur give et estimat for den genererede støj – enten ud fra modeller eller på empirisk grundlag.

I [20] gennemgås en række mekanismer med henblik på at bestemme frekvensområdet for deres indflydelse (se også afsnit 3.1). Det nævnes, at periodiske påvirkninger (fra dæk eller vejbane) med en afstand på λ vil give anledning til en frekvens $f = \lambda / v$, hvor v er farten. Således vil en periodisk ruhed med $\lambda = 14$ mm (svarende til en maksimal stenstørrelse på ca. 11 mm) ved en fart på 50-90 km/t give anledning til en frekvens på ca. 1000-1.800 Hz. Tilsvarende vil en typisk dimension af en mønsterblok for et personbildek på ca. 30 mm give anledning til en frekvens ved 50-90 km/t på ca. 500-850 Hz. For lastbildek er en typisk dækmønsterdimension ca. dobbelt så stor som for personbiler, og påvirkningsfrekvensen bliver derfor halvt så stor. Det nævnes i [20], at disse påvirkningsfrekvenser kan anslå resonanser i dækbæltet, hvor den dominerende bølgetype ved 500-1.000 Hz netop er bøjningsbølger. De største bidrag til det totale A-vægtede støjniveau skyldes normalt 1/3-oktav-båndene i området 500-2.000 Hz. Det er bemærkelsesværdigt, at mange påvirkningsfrekvenser netop findes i det frekvensområde, hvor støjen er kraftigst omkring 1.000 Hz.

Flere modeller (jf. [20]) viser, at svag støj er relateret til mindre megateksturniveauer (især omkring bølgelængder på 50-100 mm) og større mikroteksturniveauer (især omkring bølgelængder på 3,1-6,3 mm). Således understreges i [20] vigtigheden af at basere støjmodeller på teksturspektre og en simpel model, som var tænkt anvendt til relative vurderinger af vejbelægnings indflydelse på støjen, er fremsat. Der benyttes en støjindikator kaldet Estimated Road Noisiness Level ($ERNL_c$), som er justeret, så værdierne ligner værdien af $L_{pA, max, fast}$ i 7,5 m afstand for en personbil ved 70 km/t svarende til det maksimale støjniveau L_{Amax} som måles ved SPB vejside støjmålinger på personbiler korregeret til en fart på 70 km/t [10, 17].

$$ERNL_c = 0,5 \times L_{80} - 0,25 \times L_5 + 60 \text{ dB} \quad (2)$$

hvor L_{80} og L_5 betegner profilniveauet i oktavbåndene centreret om bølgelængderne 80 og 5 mm – jævnfør figur 5.2. I den senere fremsatte standard for måling af teksturspektre (ISO 13473-4) [11] er centerfrekvenserne for heloktavbåndene forskudt 1/3-oktav, således at det nu anbefales at bruge L_{63} og L_4 , som vist i figuren. Dette er næppe afgørende for modellen, som kunne modificeres tilsvarende, hvilket er forsøgt her:

$$ERNL_c = 0,5 \times L_{63} - 0,25 \times L_4 + 60 \text{ dB} \quad (3)$$

Denne modifikation kan betyde en mindre unøjagtighed på de beregnede absolutte støjniveauer, men formelen vurderes at være direkte anvendelig til beregning af relative støjforskelle mellem forskellige slidlag.

Modellen i (2) er ikke ajourført på dette punkt. Derimod er den udbygget med korrektionsled, der tager højde for belægningens alder og en korrektion for porøse belægninger (drænasfalt) – resultatet kaldes så Combined Road Noisiness Level for personbiler:

$$CRNL_c = 0,5 \times L_{80} - 0,25 \times L_5 - u \times (2 - Y) q \times \ln(\Omega \times d) + 67 \quad (4)$$

hvor Y er belægningens alder i år, u er en konstant, der er 0,8 for $Y < 2$ år og 0, hvis $Y > 2$ år eller hvis $MPD > 1$ mm. Ω er hulrumprocenten for porøse belægninger (baseret på volumen), d er tykkelsen af det porøse lag i mm, og q er 0 for $(\Omega \times d) \leq 4,5$, 4,7 for $4,5 < (\Omega \times d) < 20$ og 7 for $(\Omega \times d) \geq 20$.

Det er bemærkelsesværdigt, at støjen stiger, når L_{80} (megateksturen) stiger, mens den aftager, når L_5 (makrotekstur) stiger. I en let revideret model (som i 2001 blev betragtet som sammenlignelig med langt mere sofistikerede modeller) er støjbidragene opdelt, således at støjniveauet under 1 kHz alene bestemmes af L_{80} (megateksturen), mens det for frekvenser større lig 1 kHz alene bestemmes af L_5 (makroteksturen).

Forholdene for støjen fra lastbiler er lidt mere komplicerede. Her er [20] baseret på en relation mellem SPB for personbiler ved 90 km/t og SPB for lastbiler ved 75 km/t, som afhænger af MPD for vejbelægningen. Den resulterende formel for CRNL bliver da for tunge køretøjer:

$$CRNL_t = 0,35 \times L_{80} - 0,175 \times L_5 - 0,7u \times (2 - Y) - 0,7q \times \ln(\Omega \times d) + 4 \times \log(MPD/10^{-6}) + 67 \quad (5)$$

Det bemærkes, at støjen fra lastbiler i forhold til støjen fra personbiler er lidt mindre følsom for ændringer af profilniveauerne i oktavbåndene ved bølgelængderne 80 mm og 5 mm, samt at den stiger med stigende værdi af MPD.

Der foregår en del international forskning på dette område for at skabe en bedre forståelse for og indsigt i vejoverflade-teksturens betydning for dæk/vejbane-støjen. I Holland blev der i 2008 offentliggjort en ny model kaldet "Acoustic Optimization Tool" (AOT) [30] til at beregne den forventede støjudsendelse fra prøveplader og belægninger på baggrund af målinger af en række forskellige parametre på disse belægninger. Vejdirektoratet har i forbindelse med dette projekt testet AOT i en række sammenhænge. Resultaterne fra dette præsenteres i kapitel 6.

5.2 Teksturmåleinstrumenter

For at kunne måle helt sammenhørende værdier for både støj og tekstur er der på Vejdirektoratets CPX-støjmåle-



Figur 5.3:
Teksturlaser monteret på Vejdirektoratets CPX-støjmåletrailer "deciBella" til måling af tekstur i hjulspor.

trailer "deciBellA" monteret to teksturlasere – én i hvert hjulspor (se figur 5.3). Med disse teksturlasere kan teksturspektre måles samtidig med støjmålinger og præcis i samme hjulspor. Disse lasere kan måle bølgelængder ned til ca. 2 mm. Litteraturen viser stigende interesse for endnu kortere bølgelængder og desuden for målinger i ikke kun én linje (2D), men i $2\frac{1}{2}$ D eller 3D (jf. [10, 30]). Derfor har Vejdirektoratet fået udviklet en stationær teksturlaser, som kan måle endnu kortere bølgelængder samt som ligeledes kan måle tekturen i parallelle linjer med en afstand på ned til 10 mm, således at der med dette udstyr kan foretages målinger i $2\frac{1}{2}$ D. Denne stationære teksturmåler kaldes "In-situ-TEX" (se figur 5.4).

Med den stationære teksturmåler In-situ-TEX kan texturen

af en vejbelægning måles detaljeret på et givet sted. Målingen kan foretages i en række parallelle linjer med $N \times 10$ mm afstand og en længde på max. 1,52 m. Laserens opløsning (resolution) i z-retningen (højde) er højst $8,75 \mu\text{m} = 0,008750 \text{ mm}$ (den er en faktor 10 mindre ved midling af 128 samples). I x-retningen (længderetningen) er opløsningen 0,01 mm og laserens spot size er 0,12 mm – der resamples til en sampleafstand på 0,18 mm. Denne sampleafstand muliggør måling af evalueringsslængder på 0,092 m (svarende til diameteren af en asfaltborekerne) – og multipla med 2 op til 1,475 m (ca. svarende til skinnens maksimale længde). Der kan således måles på borekerner, Marshal-legemer, laboratoriefremstillede prøveplader og lignende samt på almindelige vejbelægninger på vejstrækninger. Da målingerne kan



Figur 5.4: Vejdirektoratets nye laserbaserede tekstur-måleudstyr "In-situ-TEX" på forsøgsbelægning. I baggrunden ses målebilen med interfacebox og strømforsyning samt PC med måleprogrammet.

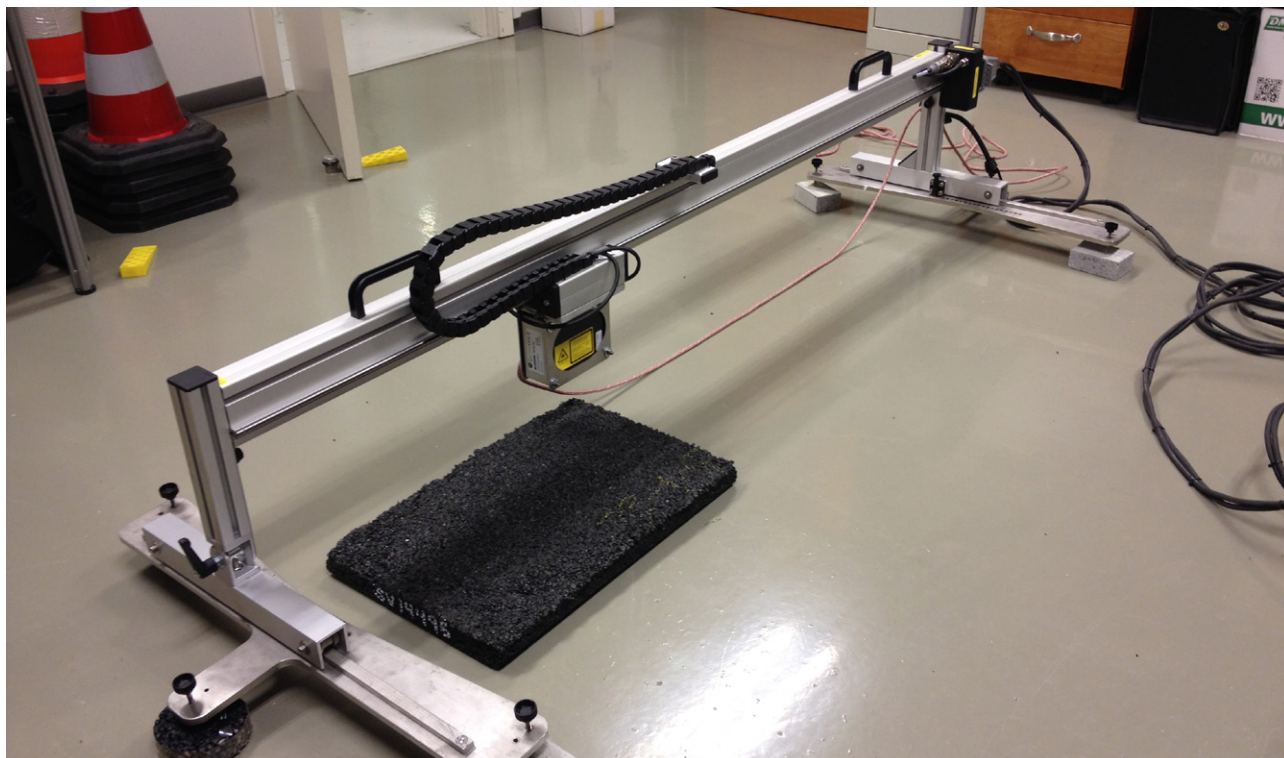


Figur 5.5: Close-up foto af en vejoverflade, hvor laserens røde laser lysplet tydeligt ses ved den røde pil.

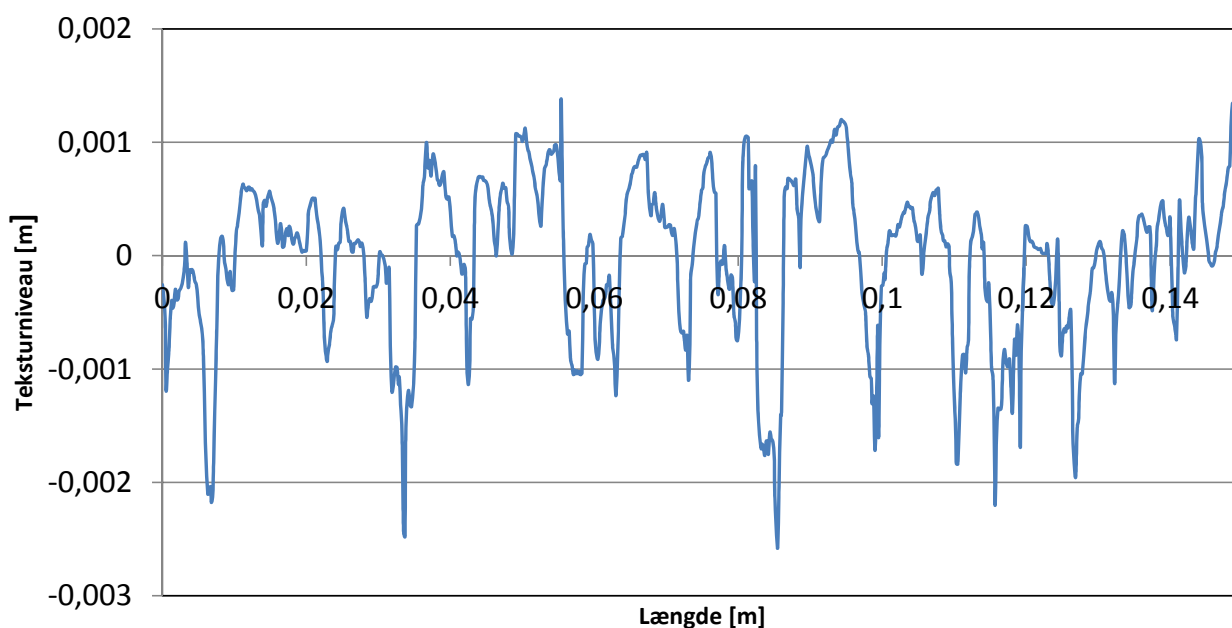
udføres i parallelle spor, kan instrumentet også give input til modeller, som anvender tekstur-data i $2\frac{1}{2}D$.

Den stationære teksturmåler In-situ-TEX ses på fotoet i figur 5.4, idet målebilen rummer interfacebox og strømforsyning til laseren samt en PC med måleprogrammet. figur 5.5 viser et close-up foto af en vejoverflade, hvor laserens røde laser-lyspet tydeligt kan ses.

På figur 5.6 ses "In-situ-TEX" i laboratoriet, hvor der udføres teksturmålinger på nogle laboratoriefremstillede prøveplader. I både kapitel 7 og 8 anvendes måleresultater fra In-situ-TEX til analyser af overfladeteksturen på nogle laboratoriefremstillede prøveplader. Her ses således forskellige præsentationer af måleresultaterne. figur 5.7 viser et eksempel på et 15 cm langt udsnit af et teksturprofil målt med "In-situ-TEX".



Figur 5.6:
"In-situ-TEX" i laboratoriet, hvor der udføres teksturmålinger på en prøveplade.



Figur 5.7:
Eksempel på et 15 cm langt udsnit af et teksturprofil målt med "In-situ-TEX".

6. Evaluering af beregningsværktøjet AOT

Prøveplader af nye støjreducerende belægningstyper kan produceres i laboratoriet (se kapitel 7). Der kan foretages forskellige test på sådanne prøveplader så som sporkøringstest med "Hamborg" udstyr (se kapitel 7) samt målinger af friktion med pendulmetoden. Det er ikke muligt direkte at måle, hvad støjen vil være på en prøveplade; dette kan først gøres når der etableres en fuldskala prøvestrækning på en vej, hvor CPX-støjtrailermetoden eller SPB vejsidemetoden kan anvendes. I laboratoriet kan der dog foretages målinger af forskellige parametre, som kan give en indikation af støjreduktionen fra en ny belægning. Disse parametre er indbygget hulrum, permeabilitet, akustisk absorption målt på en borekerne fra prøvepladen samt belægningens overfladetekstur målt med laser udstyr (se kapitel 5). I [29] findes eksempler på og vurderinger af sådanne laboratoriemålinger udført på prøveplader af poroelastisk vejbelægningsmateriale.

Da dette optimeringsprojekt startede i 2009 var det bl.a. intentionen at undersøge, om det var muligt at anvende et nyudviklet hollandsk beregningsværktøj kaldet "Acoustic Optimization Tool" (AOT) [30] til at beregne den forventede støjudsendelse fra prøveplader på baggrund af målinger af forskellige parametre på disse plader. AOT er en mere avanceret og kompleks model end de mere simple modeller primært baseret på tekstur-data, som blev præsenteret i kapitel 5. Vejdirektoratet har derfor i dette projekt foretaget en vurdering af AOT i forhold til virkelige resultater fra støjmålinger, som kort præsenteres i afsnit 6.2. Desuden har Vejdirektoratet anvendt AOT til at vurdere støjen på prøveplader af 12 forskellige typer støjreducerende belægninger i samarbejde med et universitet i Californien. Dette arbejde præsenteres kort i afsnit 6.3.

6.1 Præsentation af beregningsværktøjet AOT

Acoustic Optimisation Tool (AOT) er et hollandsk udviklet værktøj indkøbt af Vejdirektoratet. AOT består af et program, som installeres på en PC [31]. I dette program opstilles beregningens forudsætninger og inddata. Derefter kommunikerer programmet via Internettet med en server i Tyskland, hvor selve beregningsprogrammet findes. Resultaterne sendes tilbage og præsenteres på PC'en. Som resultater kan leveres støjniveauer svarende til SPB vejside-målemetoden samt svarende til CPX-støjtrailer målemetoden. Resultaterne præsenteres som L_{Amax} niveauer samt som frekvensspektre i et "smalt", men dog vigtigt frekvensinterval fra 315 til 2.000 Hz.

Som inddata til metoden anvendes følgende fire parametre, som på forskellig vis beskriver fysiske og akustiske karakteristika for en vejbelægning:

1. Belægningens overfladetekstur, der kan måles med laserudstyr som fx den "In-situ-TEX" lasermåleskinne Vejdirektoratet anvender (se evt. kapitel 5). Teksturen har stor betydning for den vibrationsgenererede støj (se evt. afsnit 3.1).
2. Akustisk Impedans som er et udtryk for en vejbelægningens eventuelle støjabsorberende egenskaber. Lyd absorptionen kan måles med et specielt måleudstyr på borekerner. Vejdirektoratet har udstyr til at gennemføre sådanne målinger (se evt. en beskrivelse i [29]).
3. Flow Modstand, som er et udtryk for den modstand luftflowet fra en dækprofil, der ruller på en vejoverflade, møder i kontaktzonen mellem dæk og vejbane. Dette fænomen kaldes normalt støj fra luftpumpning (se evt. afsnit 3.1).
4. Den Mekaniske Impedans, som er et mål for belægningens eventuelle elasticitet. Denne parameter har kun betydning for støjen fra poroelastiske vejbelægninger, hvor en del af stenmaterialet udskiftes med gummikorn for at gøre belægningen elastisk og derved at reducere den vibrationsgenererede støj. I [29] findes en beskrivelse af et fransk udstyr til måling af mekaniske impedans.

AOT er bl.a. udviklet og inventeret på baggrund af målinger af disse fire parametre samt på baggrund af SPB- og CPX-støjmålinger på omkring 40 forskellige nye belægninger på "Kloosterzande" forsøgsanlægget i Holland [32]. Blandt disse 40 belægninger findes tæt asfaltbeton, SMA-belægninger, støjreducerende tyndlagsbelægninger samt drænasfalt og poroelastiske belægninger.

For kunne foretage en beregning med AOT, skal man i programmet opstille egne måledata for de fire parametre, som indgår i metoden. Metoden indeholder katalogværdier af de fire parametre for alle de 40 belægninger fra Kloosterzande. Hvis man mangler egne måledata for en eller flere parametre, kan man vælge katalogværdier for den belægningstype, der ligger tættest på den belægning man ønsker at foretage en beregning på. AOT er således som udgangspunkt en ganske fleksibel metode.

Så vidt vides er AOT [30, 31] ikke blevet vedligeholdt og videreudviklet af det firma, som stod for udviklingen af værktøjet, siden det blev offentliggjort i slutningen af 2008. Det vurderes, at metoden ikke har fundet en bred anvendelse blandt folk, der arbejder med udvikling af støjreducerende vejbelægninger i Europa.

6.2 Test af AOT i forhold til støjmålinger

Som en første verifikation af AOT er der foretaget en test med metodens egne data af de fire parametre for seks udvalgte belægnings typer [27]. Der er valgt en ISO belægning som er en tæt asfaltbeton med 8 mm sten, en tæt asfaltbeton med 16 mm sten, tre SMA-belægninger samt en poroelastisk belægning (Regupol 6010 MF). For disse seks belægninger er AOT anvendt til at beregne CPX-støjniveauet ved 70 km/t. Desuden er de målte CPX-støjniveauer ved 70 km/t på de valgte seks belægninger fra Kloosterzande fundet i en rapport om måleresultater fra Kloosterzande [32]. De beregnede og de målte CPX-støjniveauer er præsenteret i figur 6.1, hvor det ses, at AOT konsekvent for disse eksempler beregner 1 til 3 dB lavere niveauer end de målte resultater.

Vejdirektoratet startede i 2010 et demonstrationsprojekt for støjreducerende belægninger på hovedlandevej ved Igelsø [33], hvor der blev udlagt seks forskellige belægninger. Vejdirektoratet har løbende foretaget både SPB- og CPX-støjmålinger samt teksturmålinger på disse belægninger. Tidsmæssigt samørende data for tre af belægningerne blev udvalgt (AB 6å, SMA 8 samt SMA 6+8). Der er foretaget AOT-beregninger af støjen for disse tre belægninger. Som inddata er anvendt den målte tekstur fra demonstrationsstrækningerne. Da der

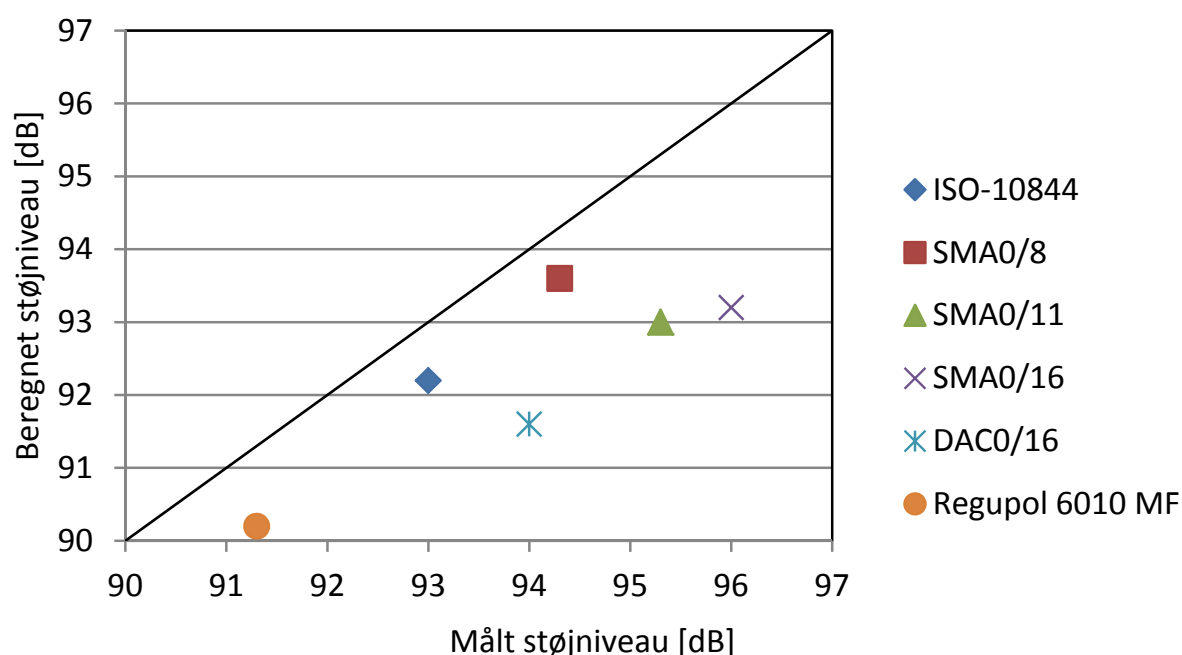
ikke var data til rådighed om Akustisk Impedans, Flow Modstand samt Mekanisk Impedans, valgtes det at bruge AOT's database, hvor der findes tre belægninger, som umiddelbart svarer til de tre valgte belægninger. Der blev ved AOT-beregningerne af støjen (SPB og CPX) anvendt katalogværdier for disse tre parametre.

Resultaterne fra henholdsvis AOT-beregninger samt støjmålinger på forsøgsstrækningen fremgår af nedenstående figurer. Figur 6.2 viser resultaterne for CPX, hvor det ses, at der for AB 6å belægningen er meget fin overensstemmelse mellem målte og beregnede niveauer. For de to andre belægninger ligger de beregnede niveauer derimod 1,6 til 2,5 dB under de målte niveauer. Det samme ses på figur 6.3 for SPB, hvor alle de beregnede niveauer ligger 2,9 til 3,3 dB under de målte. Den støjmessige rangordning af belægningerne er dog den samme for de beregnede og de målte niveauer.

Sammenfattende indikerer disse eksempler at AOT generelt underestimerer støjen med 1 til 3 dB, men rangordner belægningerne på samme måde som målingerne.

6.3 Brug af AOT til beregning af støj fra laboratoriefremstillede test-belægninger

Vejdirektoratet indledte i 2008 et forskningssamarbejde om støjreducerende vejbelægninger med CALTRANS, som er transportmyndigheden i Californien i USA. Som en del af dette samarbejde arbejdede en af Vejdirektoratets støjforskere et år i USA på University of California Pavement Research Center (UCPRC). Formålet med et af de fælles projekter var at evaluere støj og holdbarhedsegenskaber ved potentielle støjreducerende belægning-



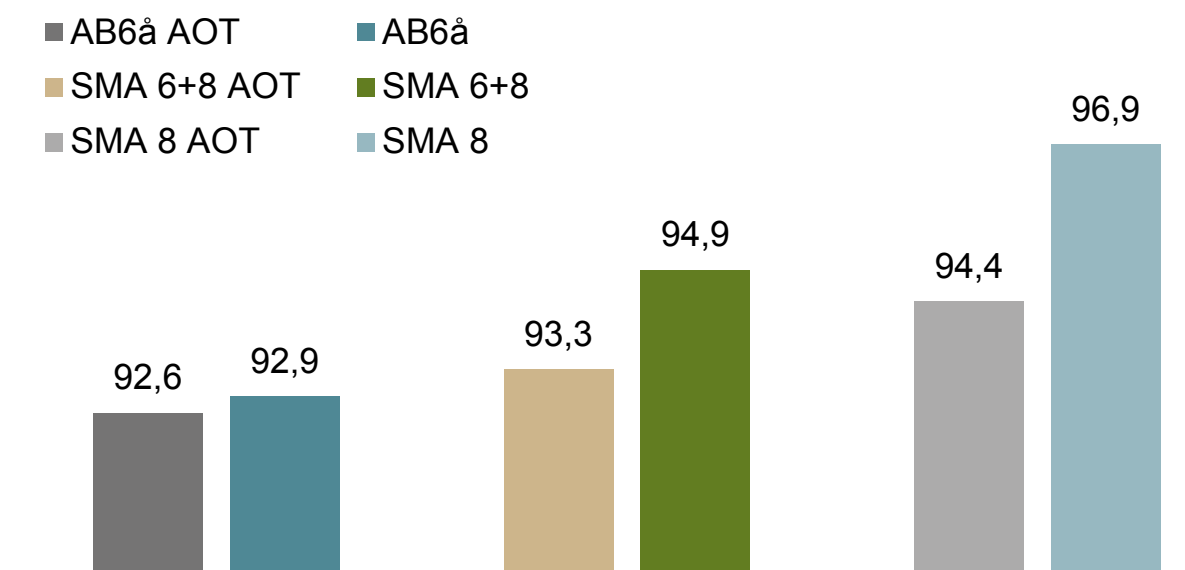
Figur 6.1:
Målte og beregnede CPX-støjniveauer ved 70 km/t for udvalgte belægninger fra AOT's database [27].

ger. Ideen var at evaluere de støjdæmpende egenskaber på en række belægningsprøver fremstillet i laboratoriet. På den baggrund var det planen at udvælge nogle få belægninger med forventede gode støjreducerende egenskaber til fuldskalatest på nogle veje i Californien.

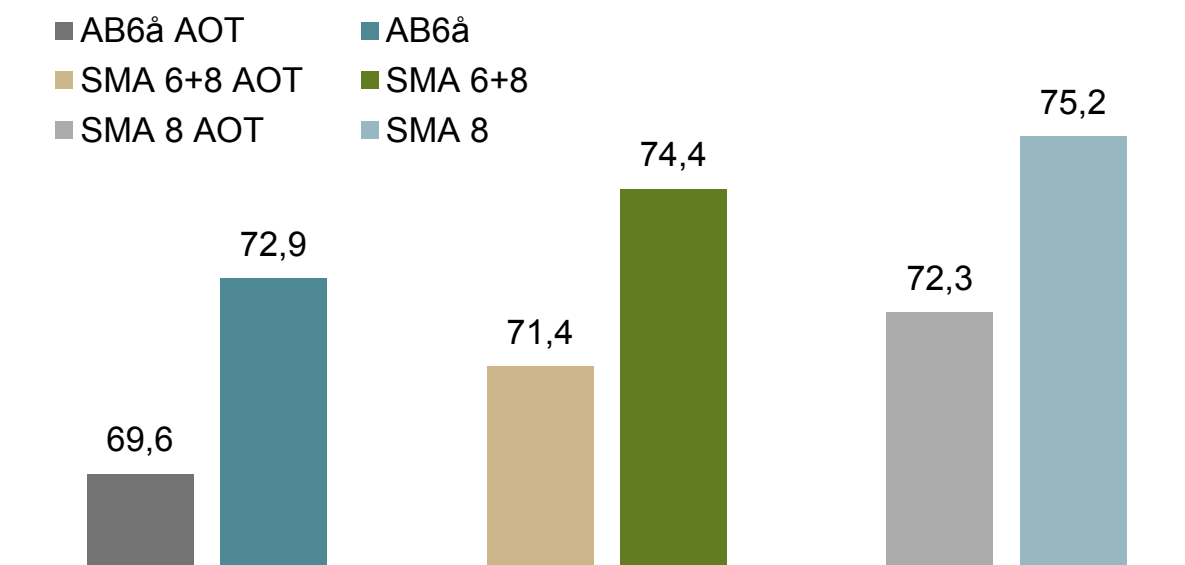
På UCPRC-laboratoriet blev der fremstillet vejbelægningsplader af 12 lovende asfaltblandinger. Til komprimeringen blev der anvendt en lille tromle (se figur 6.4) for at tilstræbe en komprimering, som så vidt muligt svarede til komprimeringen ved fuldskala belægningsarbejde.

På denne måde var det intentionen at den resulterende overfladetekstur på prøvepladerne svarede til den tekstur, som opnås ved fuldskala belægningsudlægning. De tolv vejbelægninger blev inddelt i tre grupper:

1. En tæt graderet asfaltbeton som referencebelægning med 12,5 mm sten (DG125)
2. To tynde og åbengraderede skærvemastiks-asfaltbelægninger (SMA) med 4 og 6 mm maksimal stenstørrelse inspireret af tilsvarende støjreducerende



Figur 6.2:
CPX-resultater fra målinger samt AOT støjeregninger ved 80 km/t [27].



Figur 6.3:
SPB resultater fra målinger samt AOT støjeregninger ved 80 km/t [27].



Figur 6.4:
Prøveplader af støjreducerende slidlag blev komprimeret med en lille tromle.

belægninger, som har været anvendt i Danmark bl.a. på Kastrupvej

3. Ni forskellige udgaver af enkeltlags drænasfalt med 4,75 til 19 mm maksimal stenstørrelse og et indbygget hulrum på omkring 20 %

UCPRC udførte 3D teksturmålinger med høj opløsning på disse plader. Resultaterne blev sendt til Vejdirektoratet, som har analyseret og evalueret disse vejbelægnings akustiske egenskaber ved brug af AOT. Da der kun forelå målte tekstur-data for de 12 belægninger, var det nødvendigt at anvende AOT katalogværdier for Akustisk Impedans, Flow Modstand samt Mekanisk Impedans. Der fandtes i AOT's katalog belægninger, som rimeligt godt svarede til de tolv prøve belægninger. For at undersøge AOT's følsomhed for valget af katalogværdier blev der anvendt tre forskellige strategier til valg af disse katalogværdier:

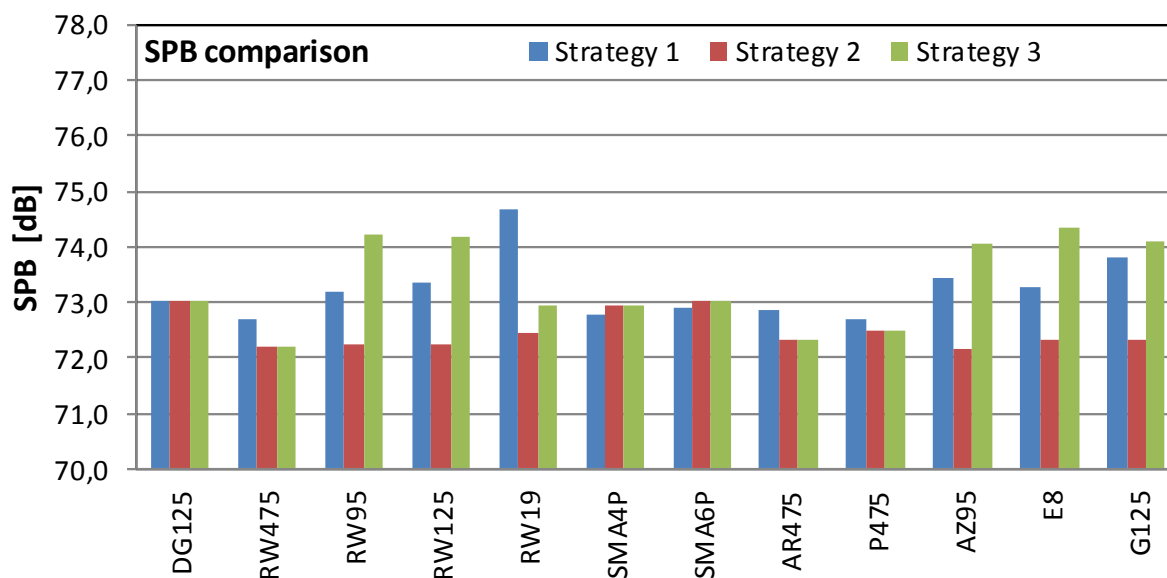
- Strategi 1. For alle 12 belægninger blev der anvendt de samme katalogværdier, hvilket var værdierne for en tæt asfaltbeton belægning.
- Strategi 2. De 12 belægninger blev underinddelt i tre

belægningsfamilier (tæt asfaltbeton, SMA og drænasfalt). For disse tre familier blev der anvendt en foruddefineret belægning i AOT, der hørte til den relevante belægningsfamilie.

- Strategi 3. For hver af de 12 belægninger valgtes den belægning i AOT's katalog, der passede bedst med hensyn til belægningstype og stenstørrelse.

Resultaterne af AOT-beregninger af SPB-støjniveauer ved 90 km/t er vist i figur 6.5. Den tætte DG125 referencelægning havde for alle tre strategier et lavt beregnet støjniveau svarende til SMA 4 og 6. Det lader til, at AOT undervurderer støjen fra denne tætte belægning. Derfor kan denne DG125 belægning ikke anvendes som reference for disse AOT-beregninger.

Generelt er forskellen belægningerne imellem ganske lille på de AOT-beregnete støjniveauer. Forskellen mellem de beregnede resultater kan ses som udtryk for, hvor godt AOT kan skelne mellem de 12 testbelægninger. En ekspertvurdering udført af forfatterne af [28] kom til konklusionen, at forskellen mellem de 12 belægninger kunne forventes at ligge på omkring 5 dB. Men de AOT-beregnete forskelle er kun det halve heraf, og det indikerer, at



Figur 6.5:
Resultaterne af AOT-beregninger af SPB-støjniveauer ved 90 km/t [28].

AOT-metoden med de tilgængelige teksturdata ikke er så følsom over for forskelle i belægningsteksturer, som det kunne forventes.

Forskellen mellem den mest og den mindst støjende belægning ved brug af Strategi 2 er mindre end 1 dB, og det tyder på, at strategien med at gruppere belægningerne i tre familier og bruge foruddefinerede AOT-katalogværdier om Akustisk Impedans og Flow Modstand ikke fungerer godt for disse tre familier.

Den største forskel mellem den mest og den mindst støjende belægning på henholdsvis 2,0 og 2,2 dB ses, når man beregner SPB-støjniveauer ved brug af enten Strategi 1 eller Strategi 3. AOT er derfor ikke meget følsom over for om der anvendes de samme forud definerede data (svarende til tæt asfalt beton) for alle 12 belægninger (Strategi 1) eller der anvendes forskellige forud definerede data, som så vidt muligt svarer til den enkelte belægning (Strategi 3).

Baseret på disse analyser kan det konkluderes, at de tre drænasfaltbelægninger med 4,75 mm maksimal stenstørrelse giver de laveste støjniveauer. På grund af usikkerheden i beregningsmetoden er det ikke muligt at bestemme, hvilken af de fire belægninger, der er den mindst støjende. SMA 4 og 6 belægningerne følger lige

efter disse finkornede drænasfalt typer Støjniveauet stiger for belægninger med stenstørrelse større end 4,75 mm.

6.4 Samlet vurdering

På baggrund af de gennemførte undersøgelser med brug af AOT viser der sig følgende tendenser:

1. De AOT-beregnete støjniveauer ligger 1 til 3 dB over målte niveauer både ved brug af SPB- og CPX-metoderne. AOT rammer ikke helt de rigtige absolut støjniveauer.
2. Forskellen mellem støjæssigt væsentligt forskellige belægninger er lille. Vurderingsmæssigt omkring halvdelen af det var forventet.
3. AOT lader til ikke at være ikke præcis nok til at rangordne forskellige støjreducerende slidlag.

Alt i alt må det konkluderes, at AOT i sin nuværende form ikke forekommer anvendelig til at vurdere støjen for de belægninger, der arbejdes med i dette optimeringsprojekt (kapitel 7). Som et alternativ kan de mere simple modeller, som tager udgangspunkt i analyser af teksturmålinger der er præsenteret i afsnit 5.1, i første omgang anvendes til overslagsmæssige beregninger af støjen fra forskellige belægningsprøver.

7. Sporkøringsfølsomhed af optimerede tynde slidlag

7.1 Baggrund

Tynde støjreducerende slidlag udgør en stor gruppe af optimerede belægningsmaterialer, som anvendes til at reducere støjemission fra trafikken. Undersøgelser og optimering af disse belægningsmaterialer har vist, at "små er godt", dvs. at slidlag med lille maksimalkornstørrelse – alt andet lige – er fordelagtigt (se evt. kapitel 3 samt [16] og [17]). Det har betydet, at overvejelser ved belægningsvalg i dag selv til højttrafikerede veje indeholder typer, som for 10-15 år siden slet ikke kom på tale alene ud fra maksimalkornstørrelsen. 8 og 6 mm stenstørrelser benyttes, og 4 mm overvejes også i visse tilfælde i udlandet (f.eks. Schweiz jf. omtale i kapitel 2 og støjresultater i kapitel 3).

Et generelt træk er derfor, at slidlaget er tyndt sammenlignet med tidligere tiders praksis for slidlag under højttrafikerede veje. Der er en "tommelfinger"-regel, at belægningslag udlægges i ca. 2,5 – 4,0 x maksimalkornstørrelse, hvilket betyder, at slidlagstykker omkring 20 mm forekommer. Det har i princippet positive konsekvenser, da det medfører et mindre forbrug af stenmaterialet til disse slidlag, som er af højere kvalitet (og dermed pris) for at klare krav til friktion og trafikens polering end de materialer, som kan anvendes til bærelagene i vejens opbygning. Det mindre forbrug er også fordelagtigt ud fra et andet forhold, da sammensætningen af stenmaterialet til disse funktionelle slidlag kan afstedkomme fordyrende specialsigtninger for at give den optimale kontrol over kornstørrelsesfordelingen, som er betydende for støjreduktionen.

Desværre er der også nogle slanger i Paradis. De tynde slidlag giver en række udlægningstekniske udfordringer – både ved anvendelse til nykonstruktion og vedligeholdelse. Varmeindholdet i disse slidlag er på grund af den beskedne masse per m² ikke stort, og afkøling til underlaget sker hurtigt og er generelt mere påvirkeligt af vejrlig (f.eks. blæst) under udlægning og komprimering. Det er en stor udfordring for entreprenørerne at udføre disse belægningsarbejder under optimale vejrforhold. Af hensyn til indflydelsen på slidlagets holdbarhed ønskes ofte større lagtykkelser end minimumsmængden, som for øvrigt også typisk er en gennemsnitsværdi over et vist belægningsareal. Denne erfaring er høstet i andre lande (f.eks. Frankrig og Holland), hvilket kom til udtryk under studieturen, som allerede er omtalt i kapitel 2, der beskriver europæiske erfaringer og anbefalinger for denne type slidlag.

Ved nykonstruktion eller hvis der udføres forstærknings-

lag før udlægning af det støjreducerende, tynde lag er der forventning til et godt, plant underlag for det nye slidlag, som derfor kan udføres i belægningstykker ned mod minimumstykkelsen for den pågældende type. Hvis der derimod er tale om, at det støjreducerende tynde slidlag skal benyttes som vedligeholdelsestiltag – enten som slidlagsfornyelse på gammelt, revet slidlag eller på affræset underlag, skal der tages højde for et eventuelt nødvendigt merforbrug af slidlagsmateriale. Specielt ved fræset overflade kan der være forholdsvis dybe ridser fra tænderne på valsen, hvis grovfræsning er anvendt, og det skal holdes op imod den beskedne maksimalkornstørrelse på de slidlag. Derfor stilles der i disse situationer også krav til anvendelse af finfræsning, men selv denne fræsningstype giver årsag til et merforbrug. Samtidigt er det vigtigt at fokusere på, at den ønskede minimumstykkelse overholdes alle steder for at sikre, at der ikke kan trænge vand ned gennem de grovteksturerede slidlag til den tidligere fræste overflade. Dette taler igen for at foreskrive øgede lagtykkelser for at opnå bedre holdbarhed.

Men der er tale om en balancegang. "Tommelfinger"-reglens maksimumsværdi på ca. 4,0 x maksimalkornstørrelsen er opstået på baggrund af brug af belægningstyper (formodentlig tætgraderet asfaltbeton), som ikke var optimerede for støjreduktion og desuden typisk havde større maksimalkornstørrelse. Tidligere erfaringer viste, at større lagtykkelser øgede risikoen for sporkøring af belægningen betragteligt. Disse nye funktionelle slidlag ønskes ofte udført i større lagtykkelser f.eks. for at opnå bedre holdbarhed gennem større varmeindhold ved komprimering eller større materialeforbrug ved udlægning på fræste overflader, end "tommelfinger"-reglen "anbefaler". På denne baggrund har det derfor været vigtigt i dette projekt at give en indikation af, hvordan typiske eksempler på tynde støjreducerende slidlag vil opføre sig med hensyn til sporkøringsfølsomhed, hvis de udlægges i større lagtykkelser end oprindeligt forudsat under asfaltproducentens optimering af asfaltmaterialets mekaniske egenskaber.

7.2 Sporkøring (eller permanente deformationer)

Sporkøring kan fremkomme som en kombination af to forskellige mekanismer:

1. efterkomprimering af belægningen fra trafikens side og
2. plastiske permanente deformationer i asfaltmaterialet

som følge af utilstrækkelig modstand mod forskydningskræfter fra trafikken

Begge mekanismer fremmes ved høje belægningstemperaturer, som sagtens kan forekomme i Danmark. Fænomenet kan i laboratoriet typisk undersøges ved to forskellige prøvninger: krybningsforsøg og Wheel Tracking Test (WTT). Der er i Danmark kutyme for at anvende WTT til dokumentation af asfaltmaterialers sporkøringsresistens.

Der findes en europæisk prøvningsstandard til udførelse af Wheel Tracking Test (DS/EN 12697-22) [41]. Prøvningen omfatter en del forskellige varianter af udstyr, men den i Danmark anerkendte variant betegnes "Model B i vand". Prøvningen indebærer, at asfaltmaterialet indtromles til en pladeformet prøve, som efter en vis lagring/modning termostateres i vand til den ønskede prøvnings-temperatur. Herefter udføres der et antal overkørsler med en belastet, gummibeklædt hjul, hvorunder deformation registreres. Efter 10.000 cykler (20.000 enkeltpassager af hjulet) afbrydes prøvningen, og resultatet vurderes. Prøvningen kan også stoppes, hvis sporkøringen nærmer sig 20 mm.

Den vigtigste parameter er prøvningstemperatur, idet belastning, hjultype og -dimensioner normalt holdes på standardværdierne. Hjulet er 50 mm bredt, beklædt med 20 mm hård gummebelægning uden mønster med en ydre diameter 200 mm. Hjulet belaster prøvepladen med en kraft på 700 N.

Prøvningstemperaturen er sædvanligvis 50 °C (eller 60 °C). Under 40 °C anses der ikke for at ske nogen nævneværdig sporkøring ved prøvningen. Til sammenligning kan nævnes, at der i Danmark er registreret belægningstemperaturer i slidlag målt i 10 mm dybde på 55-58 °C.

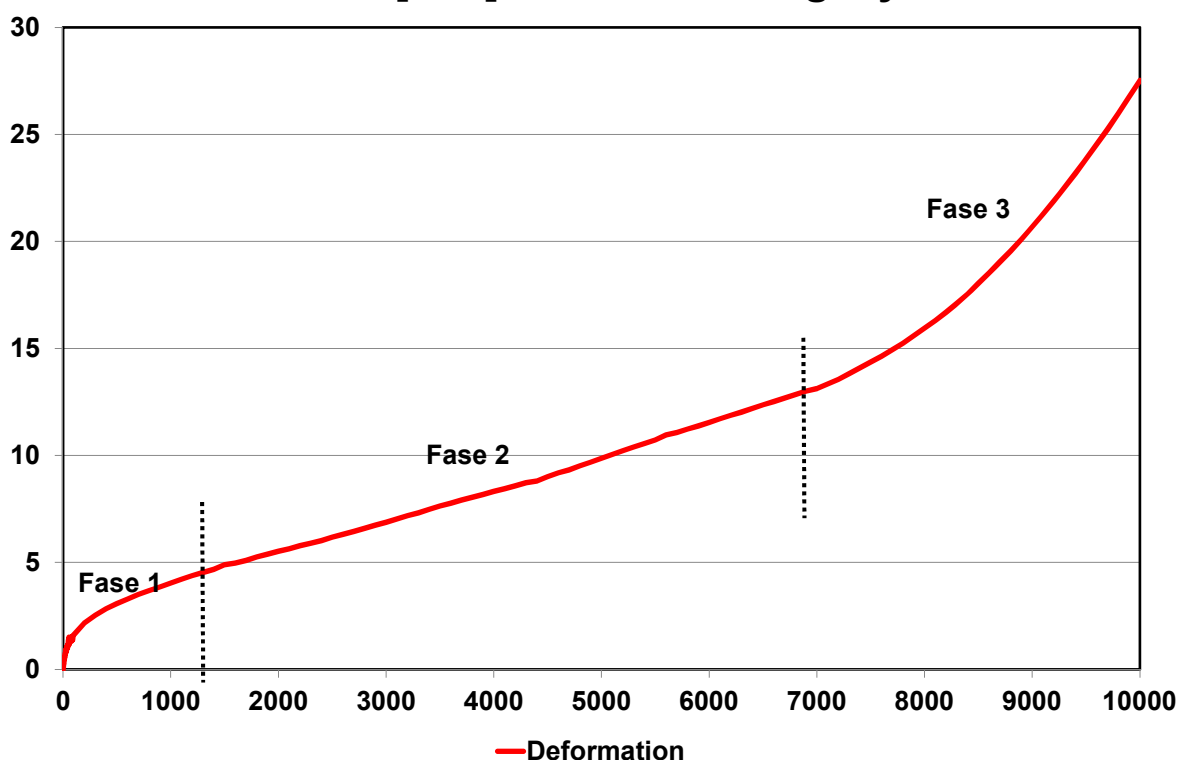
Belægningstykkelsen er sædvanligvis den samme som den normale belægningstykkelse ved udlægning. Hvis ikke andet er oplyst, tilstræbes en tykkelse af prøvepladen til 25 mm, hvis maksimal Kornstørrelsen er mindre end 8 mm. For 8 til 16 mm materialer benyttes 40 mm som tykkelse. 16 mm og derover (dvs. typisk bærelagsmaterialer) afprøves med lagtykkelser på 60 mm.

Prøvningen efter DS/EN 12697-22 Model B i vand kaldes ofte i fagligt slang for "Hamborg"-metoden, da den oprindelige udgave af prøvningen blev benyttet som kravspecifikation af vejmyndighederne i Hamborg. Den oprindelige metode er nu ændret på væsentlige punkter og er – efter kraftig dansk indflydelse – blevet ophøjet til europæisk standard. Vejdirektoratet har i 2014 anskaffet og indkøbt et Hamborg-udstyr både til produktion af prøveplader samt til testning af disse (se figur 7.2 og 7.3).

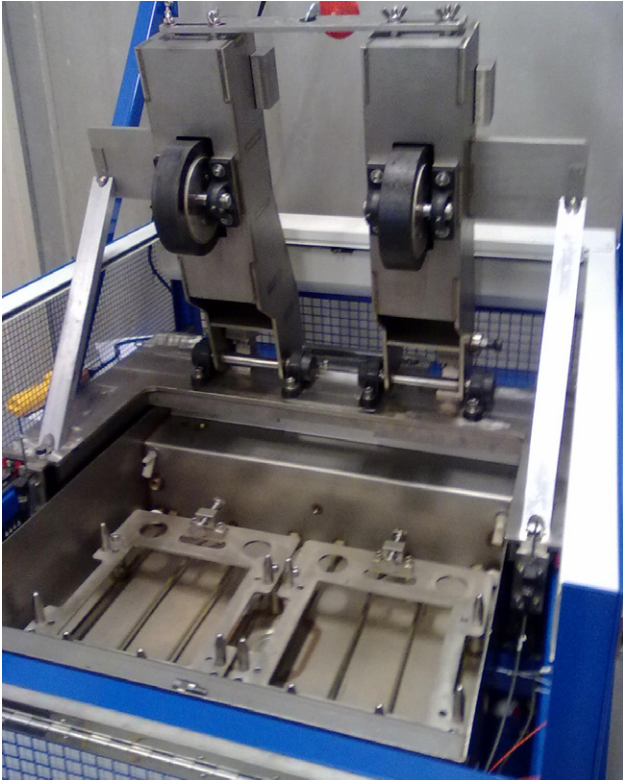
Figur 7.1 viser et idealiseret forløb af et sporkøringsforsøg, hvor materialets opførsel kan inddeles i tre faser:

- Fase 1: Initial fase med konsolidering, mørtelfjernelse og efterkomprimering

Deformation [mm] mod belastningscykler



Figur 7.1: SPB resultater fra målinger samt AOT støjberegninger ved 80 km/t [27].



Figur 7.2:
Sporkøringsapparat med løftede belastningshjul og de to platforme til placering af prøvepladerne i vandbadet.

- Fase 2: Lineær fase med retlinjet udvikling i sporkøringen (deformationen)
- Fase 3: Tertiær flow, hvor materialet deformeres plastisk i accelererende grad

Vurdering af prøvningen bygger på to værdier:

1. Deformationen efter 10.000 belastningscykler [mm] og
2. Hældningen af det retlinjede forløb mellem 5.000 og 10.000 belastningscykler [mm/1.000 cykler]

Jo lavere værdier for de to størrelser, jo bedre. Hvis belægningsprøven udviser tertiær flow inden 10.000 belastningscykler, anses det for at være uacceptabelt. Fase 3 opførsel (tertiær flow) ses meget sjældent ved sporkøringsforsøg i Danmark udført i vand. I andre landes undersøgelser kan fase 3 opførsel forekomme, hvis man har forsøgt at opnå sporkøringsresistens ved at gøre asfalt "mager" (dvs. reduceret bitumen-indhold). Den tertiære fase er så snarere et resultat af materialetab i sporet på grund af vandfortrængning og ikke på grund af plastiske deformationer. Netop dette forhold er en af de betydende årsager til, at det i Danmark foretrækkes at prøvningen udføres i vand, da det samtidig giver en sikring mod dårlig holdbarhed som følge af for lidt bindemiddel i asfalten.

7.3 Forsøgsplan

Afgrænsning af formål i relation til forsøgsplanen



Figur 7.3:
Tromleapparat til komprimering af prøvepladerne til sporkøringsapparatet.

Hovedformålet med denne undersøgelse i projektet om optimering af tynde støjrreducerende slidlag er:

- Under laboratorieforhold at undersøge indflydelse af indbygningshøjden for eksempler på tynde, støjrreducerende slidlag med hensyn til sporkøringsfølsomheden
- Som et spin-off undersøges også initial-teksturen af asfalter komprimeret til prøveplader under laboratorieforhold.

Målingerne af teksturen er udført med den laser-målebjælke "In-situ-TEX", der er beskrevet i afsnit 5.2. Målingerne er i denne sammenhæng blandt andet udført for at undersøge homogeniteten af den komprimerede prøveplade. Årsagen til at der her fokuseres på initial-teksturen på laboratoriekomprimerede prøver skyldes, at teksturen på prøvepladerne ikke er udsat for normal trafikbelastning, således at overfladen svarer til den nyudlagte belægning førend den udsættes for trafik. I en anden del af det overordnede projekt (kapitel 8) vil disse teksturmålinger med højopløsningslaser blive sammenlignet med teksturer fra de pågældende forsøgsstrækninger på rigtige veje. Her måles teksturen sædvanligvis mindst 4- 8 uger efter udlægning, for at trafikken skal have mulighed for at fjerne den mørtelhinde, som forekommer på overfladen efter udlægning.

I de næste afsnit vil de valgte parametre for betydende

elementer (komprimeringsgrad, prøvningstemperatur, indbygningshøjder, lagring (modning), materialer, målte størrelser) blive omtalt.

Komprimeringsforhold

Komprimeringen af prøvepladerne er en meget vigtig parameter for at opnå sammenlignelige resultater. Men prøvningsmetoden DS/EN 12697-22 foreskriver kun noget om højden af prøvepladerne; ikke noget om hvilken komprimeringsgrad prøven skal have i forhold til den ønskede mix design-værdi. Det giver en stor frihedsgrad i anvendelse af prøvningsmetoden til mange forskellige formål, men den ønskede komprimering af prøvepladerne må fastlægges meget præcist, hvis sammenligninger skal finde sted.

Udbudsforskriften for varmblandet asfalt – Almindelig arbejdsbeskrivelse [42] foreskriver, at komprimeringsgraden målt i forhold til asfaltdensiteten efter Marshall er $\geq 97,5\%$, hvis prøvningen skal benyttes til at demonstrere forbedrede sporkøringssegenskaber. Derfor er der i denne undersøgelse tilstræbt en komprimeringsgrad på $97,5\%$ for alle de undersøgte prøver. Den aktuelt opnåede komprimeringsgrad for hele prøvepladen inden test er forsøgt bestemt, så mindre produktionsvariationer omkring til stræbte komprimeringsgrad kan bidrage i tolkningen af sporkøringsresultaterne.

Prøvningstemperatur

Prøvningstemperaturen er som tidligere omtalt typisk enten $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Igen med henvisning til Udbudsforskriften for varmblandet asfalt – Almindelig arbejdsbeskrivelse [42] opstilles der nogle retningslinjer til supplerende af prøvningsmetoden. Til slidlag med middel eller tung trafik skal sporkøringsforsøget udføres ved:

- $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvis blødhedspunkt kugle og ring af bindemidlet i asfalten er mindre end $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller
- $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvis blødhedspunkt kugle og ring af bindemidlet i asfalten er $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller større.

Der er samtidig en "tommelfinger"-regel, der siger at prøvningstemperaturen bør være mindre end blødhedspunkt kugle og ring, da man i modsat fald kan forvente en forholdsvis stor sporkøring under prøvningen.

I denne forsøgsplan, hvor den primære undersøgelsesparameter er den udlagte tykkelse af det tynde, støjreducerende slidlag, skal der sammenlignes asfaltmaterialer af forskellig type (asfaltfamilie) og bindemiddel. Da mindst ét af de undersøgte materialer designmæssigt har et blødhedspunkt kugle og ring på $57\text{ }^{\circ}\text{C}$, er det besluttet, at prøvningen for alle materialer skal ske ved $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Højder af prøvepladerne

De undersøgte asfaltmaterialer har varierende nominel maksimalkornstørrelse, hvorfor det også kan få indflydelse på valget af højde af prøveplade i henhold til

prøvningsmetoden. Da det er materialernes sporkøringsfølsomhed som funktion af udlagte lagtykkelser, der er i fokus, behøver der ikke tages specielle hensyn til en specifik binding mellem stenstørrelse og lagtykkelse, når blot én af de valgte prøvehøjder er i samme størrelsesorden af den optimale for asfalttypen.

Til opnåelse af forskellige prøvehøjder i tromleapparatet ved komprimeringen i de to faste formhøjder på 50 mm og 100 mm benyttes afstandsplader af vandfast støbekrydsfinér, der også kan benyttes som stabil understøtning af prøverne under transport og lagring (modning). Der er valgt nogle kombinationer af støbekrydsfinérplader, som giver tre højder på 29 mm, 38 mm og 58 mm for prøvepladerne. Det ønskes selvfølgelig at opnå et fuldt datasæt for alle asfaltmaterialerne, men det forventedes indledningsvist, at højden på 58 mm måske ikke kunne gennemføres for visse af de mest finkornede masser på grund af for stor sporkøring.

Lagring (modning)

Prøvningsmetoden foreskriver, at prøvepladerne skal lagres ved stuetemperatur i mindst 48 timer inden prøvning. Samtidig ved sammenligningsundersøgelser må tiden fra komprimering til afprøvning ikke afvige mere end $\pm 10\%$ for de enkelte prøver. Med en termostateringstid på ca. to timer og belastningstid omkring syv timer og 12 minutter, betyder det, at en optimal udnyttelse af sporkøringsapparatet opnås ved en lagringstid på én uge. Som eksempel vil det svare til, at en prøveplade komprimeret en mandag vil blive testet den følgende mandag.

Asfaltmaterialer

Asfaltmaterialerne i denne undersøgelse består af eksempler på støjreducerende tynde slidlag, og vil i fremtiden blive søgt fulgt op med yderligere undersøgelser på udvalgte materialer fra forsøgs- og referencestrækninger i forbindelse med kommende projekter. Der er altså i dette projekt af tidsmæssige årsager tale om en vurdering af sporkøringsfølsomheden af eksempler på tynde, støjreducerende slidlag som funktion af den udlagte lagtykkelse til en indledende bedømmelse af, om et mere omfattende arbejde på dette felt skal sættes i værk, hvor andre belægningslag (bærelag og binderlag) også skal inddrages.

Asfaltmaterialerne er produceret på fuldskala asfaltværk under almindelig produktion, og udtaget og opbevaret som løst pakket materiale i papkasser à ca. 10 kg ved stuetemperatur. Materialerne er senere opvarmet kortvarigt til den angivne blandetemperatur og komprimeret som tidligere nævnt til den asfaltdensitet efter Marshall, som leverandørspecifikation oplyser. I tabel 7.1 omtales de undersøgte asfaltmaterialers type.

Teksturmålinger

Teksturmålingerne udføres med den målebom udstyret med en højopløsningslaser ("In-situ-TEX"), som er nærmere beskrevet i afsnit 5.2. Til disse undersøgelser

af teksturforholdene ved laboratoriekomprimeringen og eventuel afhængighed af indbygningshøjder er der foretaget et udvalg af målinger af sættene af prøveplader som illustreret i figur 7.4. Tromleretningen på disse kvadratiske plader kunne tænkes at have en effekt på teksturen, hvorfor dette også vurderes ved de bestemte teksturprofiler. Fra de 305 mm lange x-z profiler for hver enkelt delprøve udtages tre del-længder af ca. 92 mm til nærmere analyse og beregning (Nærmere detaljer se figur 7.10). Når der er valgt en del-længde på ca. 92 mm og ikke 100 mm skyldes det skridtlængden i x-retningen og ønsket om at have et profil, der består af et multipla af 2 i n'te, hvilket er en nødvendighed for at foretage en Fast Fourier Transform-filtrering af det målte profilerne. En vejlængde på 91,98 mm opnås med 512 datapunkter (svarende til 2⁹).

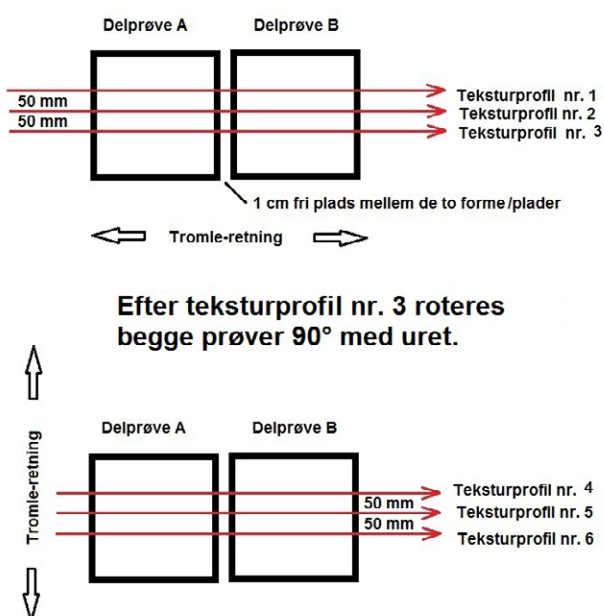
Prøve ID-nr.	Materialetype
SV12564	SMA 8 (optimeret)
SV13734	SMA 6 (optimeret)
SV14289	SMA 8 (SRS)

Tabel 7.1:
Oversigt over undersøgte asfaltermaterialer.

Resultater – målte størrelser

Til disse undersøgelser er der valgt at fokusere på resultater og beregnede størrelser fra

- Sporkøringsfølsomhed ved DS/EN 12697-22 Model B (i vand):
 - Sporkøring efter 5.000 belastningscykler



Figur 7.4:
Placering af målte teksturprofiler på delprøverne af de undersøgte asfaltermaterialer (centerlinje og ± 50 mm).

- Sporkøring efter 10.000 belastningscykler og
- Wheel Tracking Rate (WTR, sporkøringsudviklingen per 1.000 belastningscykler mellem 5.000 og 10.000 belastningscykler)
- Teksturundersøgelse med følgende beregnede størrelser:
 - Normerede teksturprofiler vurderet ved diverse fraktiler og lign. (bl.a. varians, min/max, skewness og kurtosis)

Til illustration af sten-lejringen er der foretaget tre planslib i en udvalgt prøveplade; henholdsvis i køresporet, udenfor køresporet i en forholdsvis upåvirket del af prøvepladen samt et tværprofil, hvor den største deformation forekommer som vist skematisk i figur 7.5. Den maksimale deformation forekommer ikke i centerpunktet for køresporet, hvor det belastede hjul har sin maksimale hastighed i den sinus-formede hastighedsfordeling, men i de to yderpunkter centralt under hjulet, hvor hastigheden er nul, da hjulet vender kørselsretning. I figur 7.5 er blot den ene position vist.

7.4 Resultater

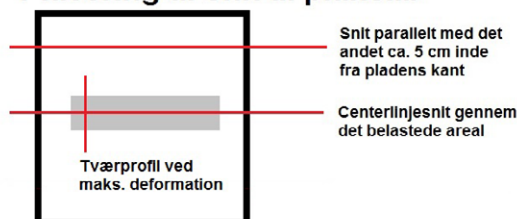
Wheel Tracking Test DS/EN 12697-22 Model B i vand

Figur 7.6 samler til oversigtsmæssig illustration alle graferne fra sporkøringsforsøgene, som er udført på de tre asfaltermaterialer med to plader for hver af tre undersøgte lagtykkelser. De støjreducerende asfaltermaterialer er vist med:

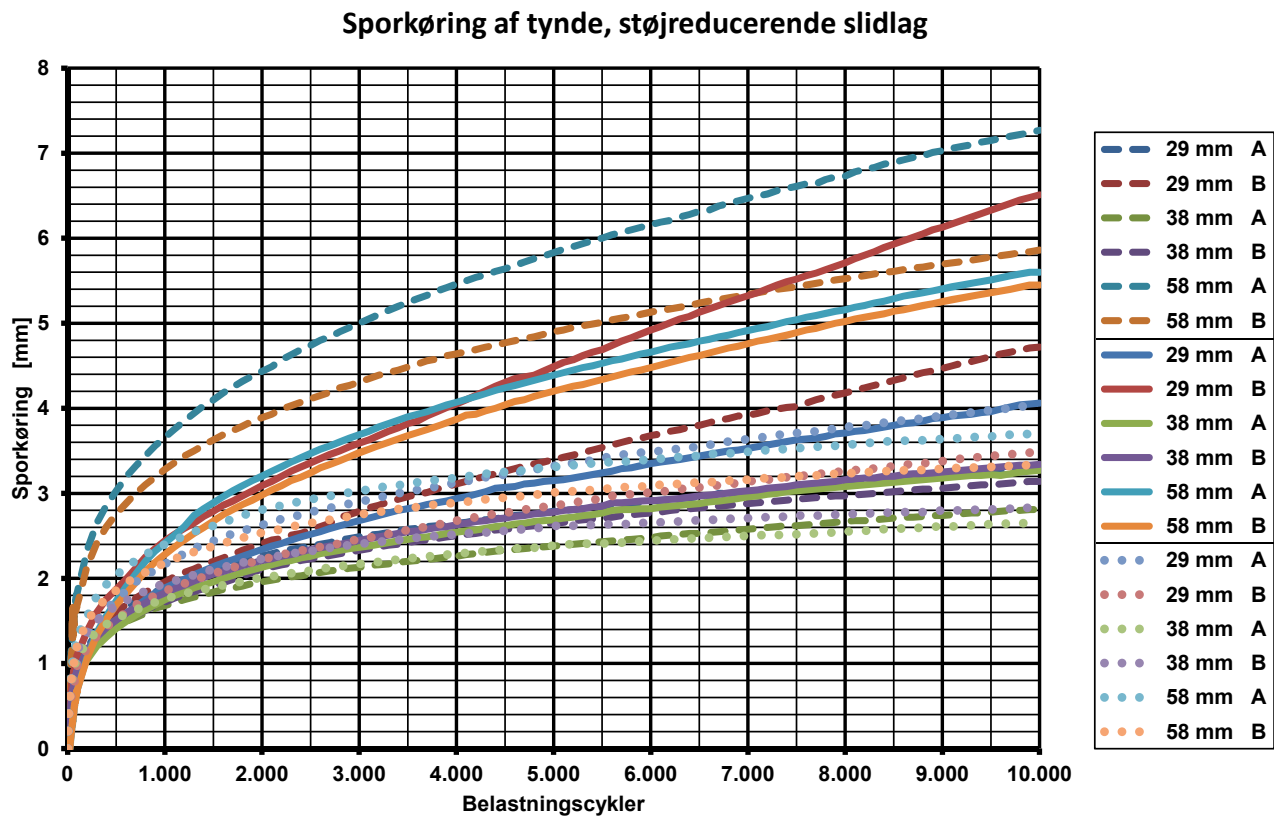
- stiplede linje SV12564 maksimal-kornstørrelse 8 mm
- fuldt optrukket linje SV13734 maksimal-kornstørrelse 6 mm
- prikket linje SV14289 maksimal-kornstørrelse 8 mm

Figur 7.7, figur 7.8 og figur 7.9 viser de seks enkeltresultater for hvert af de tre asfaltermaterialer.

Placering af snit til planslib

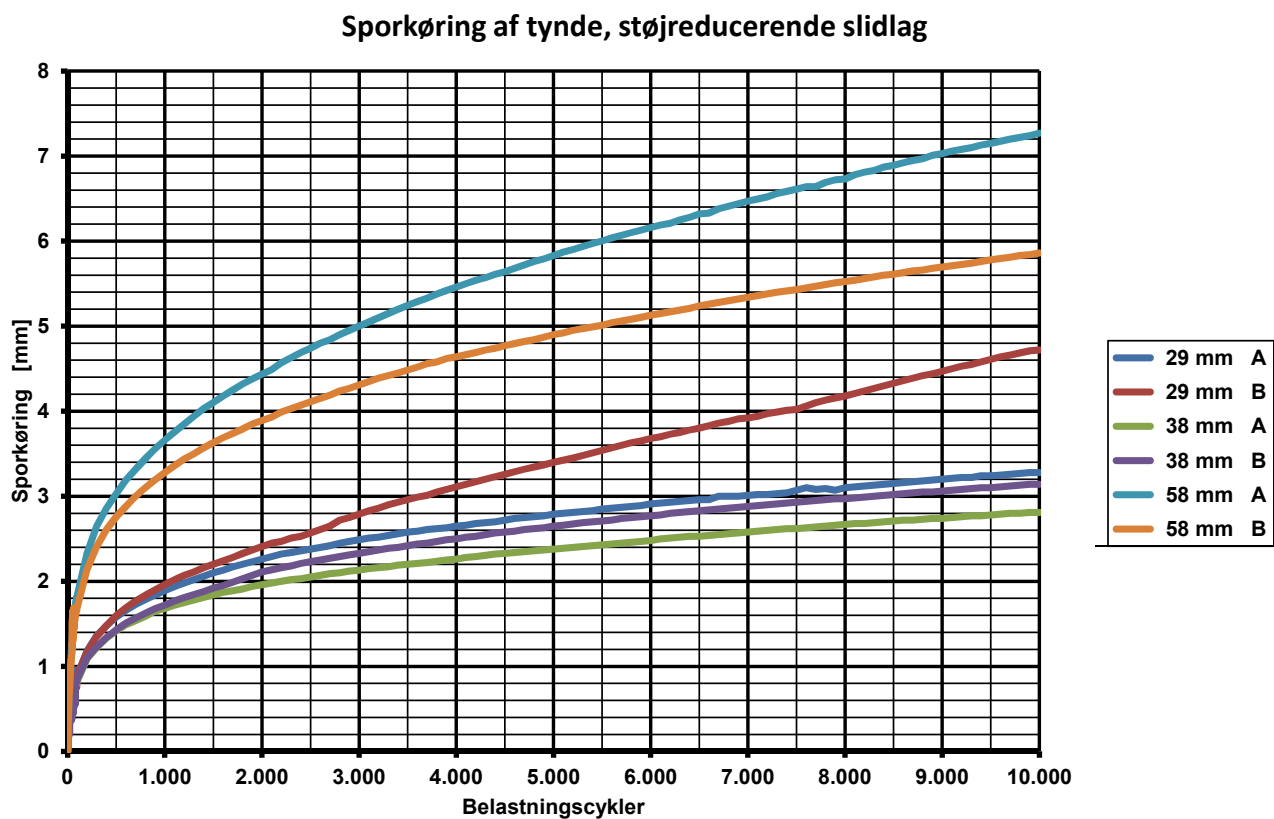


Figur 7.5:
Placering af snit til planslib af SV13734 II (58 mm) til illustration af sporkøringsindflydelse på stenlejringen.



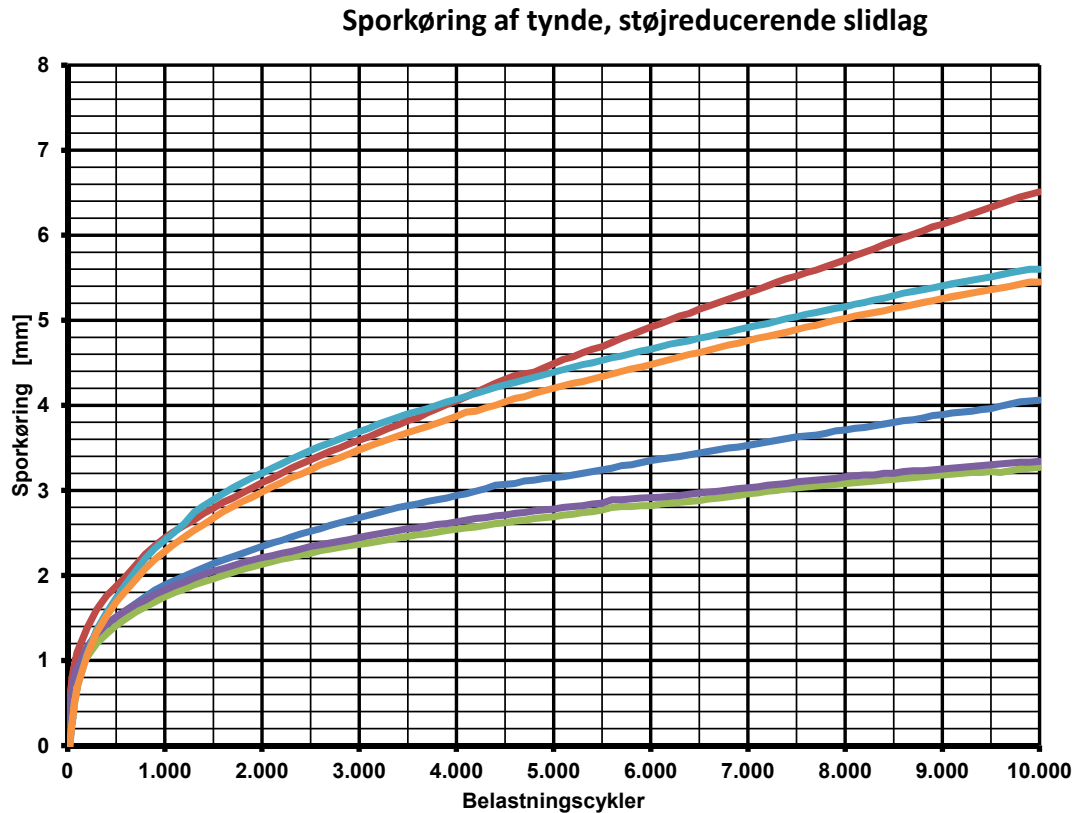
Figur 7.6:

Sporkøringsforsøg efter DS/EN 12697- 22 Model B i vand ved 50 °C (SV12564 stiplede kurve; SV13734 fuldt optrukket kurve; SV14289 prikket kurve).

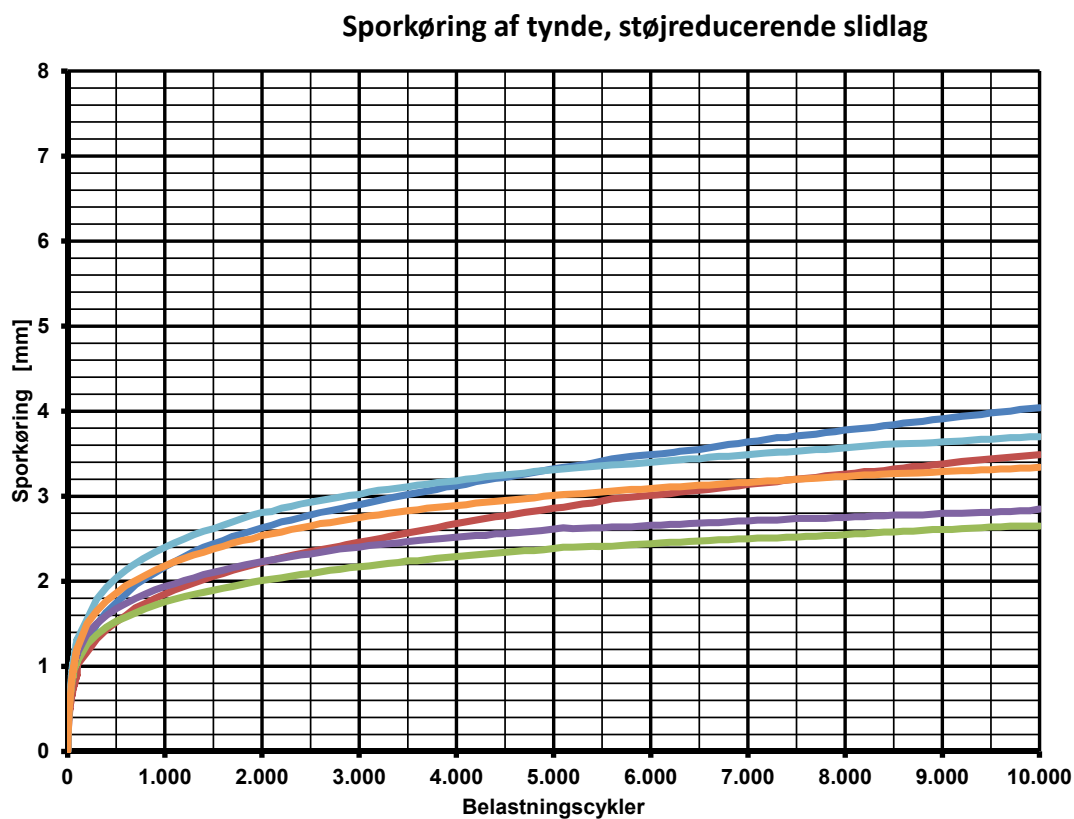


Figur 7.7:

Sporkøringsforsøg for SV12564 SMA 8 (optimeret) efter DS/EN 12697- 22 Model B i vand ved 50 °C.



Figur 7.8:
Sporkøringsforsøg for SV13734 SMA 6 (optimeret) efter DS/EN 12697- 22 Model B i vand ved 50 °C.



Figur 7.9:
Sporkøringsforsøg for SV14289 SMA 8 (SRS) efter DS/EN 12697- 22 Model B i vand ved 50 °C.

Asfalt	Maksimal-kornstørrelse	Højde	Densitet	Komprimeringsgrad	D_5000	D_10000	WTR	Cooper WTR
Prøve ID	[mm]	[mm]	[Mg/m³]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/1000]	[mm/1000]
SV12564	8	29	2,307	97,3	2,79	3,28	0,098	-0,0516
			2,289	96,5	3,40	4,72	0,264	-0,2383
		38	2,323	98,0	2,38	2,81	0,086	0,0875
			2,282	96,2	2,65	3,14	0,098	0,0987
		58	2,225	93,9	5,83	7,27	0,288	0,2901
			2,227	93,9	4,90	5,86	0,192	0,1932
SV13734	6	29	2,289	96,0	3,15	4,06	0,182	0,2088
			2,276	95,5	4,49	6,51	0,404	0,3891
		38	2,330	97,7	2,69	3,27	0,116	0,1227
			2,339	98,1	2,78	3,34	0,112	0,1253
		58	2,256	94,6	4,39	5,60	0,242	0,3158
			2,252	94,5	4,20	5,45	0,250	0,1630
SV14289	8	29	2,243	95,4	3,32	4,04	0,144	0,1808
			2,244	95,5	2,86	3,49	0,126	0,1658
		38	2,297	97,8	2,39	2,65	0,053	0,2054
			2,293	97,6	2,62	2,85	0,047	-0,1213
		58	2,276	96,9	3,31	3,70	0,078	0,0848
			2,278	96,9	3,01	3,34	0,066	0,0624

Tabel 7.2:

Vigtigste karakteristika for prøverne og resultaterne fra sporkøringsforsøgene.

Det har vist sig, at den realiserede komprimeringsgrad, vurderet ved bestemmelse af asfaltdensiteten ved vejning over og under vand af hele asfaltpladen før sporkøringsforsøget, kan afvige lidt fra den tilstræbte på 97,5 %, hvilket også kan afspejle sig i forskelle mellem plader af samme sæt. Derfor medtages denne komprimeringsgrad i tabel 7.2, hvor forsøgenes vigtigste data er vist som grundlag for den udførte variansanalyse. Tabellen indeholder to kolonner med data for Wheel Tracking rate (WTR), idet den ene beregnes direkte fra de bestemte deformationer (betegnes WTR), mens den anden er resultatet af udstyrets software (betegnes Cooper WTR). Det viser sig, at beregning af WTR med udstyrets software desværre er følsomt for, hvis det allersidste datapunkt ved 10.000 belastningscykler er påvirket af "spikes" (elektrisk støj på data).

Variansanalyse af WTT data

Data fra tabel 7.2 og tabel 7.3 benyttes til tosidet variansanalyse med hensyn til faktorerne Prøve og højde af plade. Faktoren Plade (dvs. om talstørrelse hidrører fra plade A eller B) er udeladt i gennemgangen af sporkøringsforsøgene, da den ved analyse ikke havde nogen indflydelse på de undersøgte størrelser; altså ingen systematisk indflydelse af produktionsrækkefølgen af plader af samme materiale.

Variansanalysen af deformationen efter 5.000 belastningscykler (D_5000) viser, at faktoren Højde har en

signifikant indflydelse ($P = 0,0019$), men hvis komprimeringsgraden bruges som covariant, så forsvinder indflydelsen af højden på D_5000. Variansanalysen af deformationen efter 10.000 belastningscykler (D_10000) viser, at faktoren Højde har en signifikant indflydelse ($P = 0,0046$) og faktoren Prøve er på kanten til at have en svag signifikant indflydelse ($P = 0,0533$). Hvis komprimeringsgraden igen bruges som covariant til D_10000, så forsvinder indflydelsen af begge de nævnte faktorer på deformationen efter 10.000 belastningscykler.

Variansanalysen af Wheel Tracking Rate (hældningen af kurven fra 5.000 til 10.000 belastningscykler) viser, at begge faktorer (Prøve og Højde) har en svag signifikant indflydelse på resultatet med henholdsvis ($P = 0,0151$) og ($P = 0,0205$). Hvis variansanalysen udføres med komprimeringsgraden som covariant til WTR, så forsvinder indflydelsen af højden, mens indflydelse af prøven bevares som svag signifikant ($P = 0,0307$).

Belastningsforsøg på materialer, der fører til deformationer, som vist i Fase 1 og 2 i figur 7.1, kan tilnærmes en potensfunktion, når man udelader det allerførste del af forløbet. Kurverne fra Wheel Tracking Test for området 100 til 10.000 belastningscykler er derfor tilnærmet til en potensfunktion, som vist i formel 6 som er en potensfunktion for sporkøring (Y) mod antal belastningscykler (X) for 100 til 10.000 belastningscykler. Resultatet af regressionsberegningerne samt korrelationskoefficienten

Asfalt	Maksimal-kornstørrelse	Højde	Densitet	Komprimeringsgrad	A faktor	B eksponent	R ²
Prøve ID	[mm]	[mm]	[Mg/m ³]	[%]	[mm]		
SV12564	8	29	2,307	97,3	0,3255	0,2521	0,9926
			2,289	96,5	0,1608	0,3607	0,9907
		38	2,323	98,0	0,3215	0,2358	0,9937
			2,282	96,2	0,2699	0,2678	0,9977
		58	2,225	93,9	0,4829	0,2931	0,9991
			2,227	93,9	0,5564	0,2556	0,9989
SV13734	6	29	2,289	96,0	0,2048	0,3218	0,9987
			2,276	95,5	0,1507	0,4018	0,9897
		38	2,330	97,7	0,2437	0,2826	0,9970
			2,339	98,1	0,2863	0,2672	0,9987
		58	2,256	94,6	0,1480	0,3978	0,9864
			2,252	94,5	0,1351	0,4035	0,9937
SV14289	8	29	2,243	95,4	0,3194	0,2753	0,9983
			2,244	95,5	0,2774	0,2740	0,9993
		38	2,297	97,8	0,4772	0,1877	0,9956
			2,293	97,6	0,5587	0,1793	0,9846
		58	2,276	96,9	0,5749	0,2047	0,9869
			2,278	96,9	0,5420	0,2001	0,9887

Tabel 7.3:

Prøvedata samt koefficienter og korrelationskoefficient til potensfunktion $Y = AX^B$ for data fra 100 - 10.000 belastningscykler.

R² ses i tabel 7.3.

$$Y = AX^B \quad (6)$$

Variansanalysen af potensfunktionsfaktor A viser, at der er en signifikant indflydelse ($P = 0,0012$) fra faktoren Prøve, mens der er en svag signifikant indflydelse fra faktoren Højde ($P = 0,0253$). Tilsvarende for eksponenten B er der en stærk signifikant indflydelse ($P = 0,0004$) fra faktoren Prøve og en svag signifikant indflydelse fra faktoren Højde ($P = 0,0129$).

Teksturprofiler

De forme, hvori prøvepladerne til spørkøringsapparatet bliver indtromlet, er kvadratiske med en indvendig sidelængde på 305 mm. Som illustreret i figur 7.4 optages der teksturprofiler, hvorfra der udtages delprofiler svarende til de for analyse nødvendige profilstykker. Fra teksturprofilerne (dvs. den rå x-z profil) på ca. 305 mm er der udvalgt en længde på ca. 275,9 mm, som er blevet opdelt i de tre del-afsnit som illustreret i figur 7.10.

Hvert del-afsnit består hvert bestående af 512 datapunkter med en indbyrdes afstand på 0,18 mm. Valget af del-intervaller med 512 datapunkter er foretaget for evt. at give mulighed for at foretage Fourier-transformering af profilerne før yderligere analyse. Fourier-transformeringen kræver et antal datapunkter, der er 2^x ($512 = 2^9$).

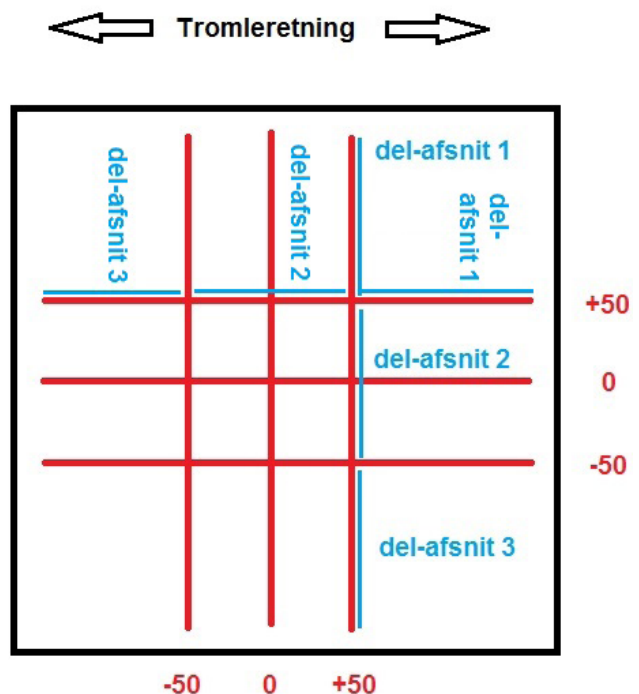
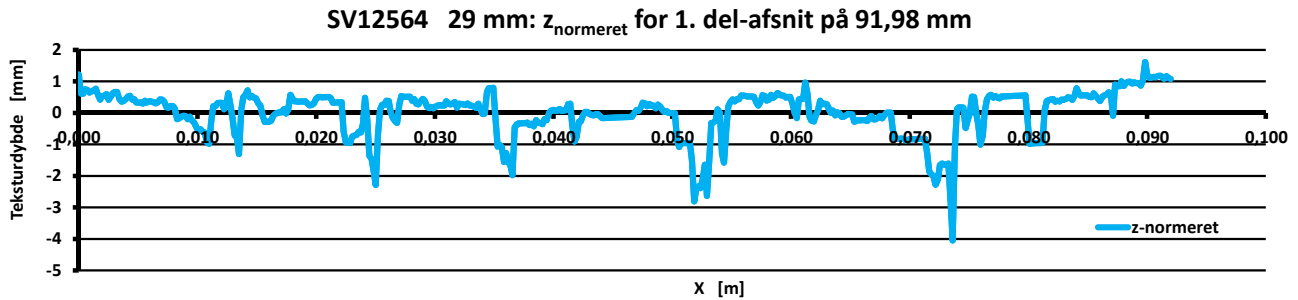
**Figur 7.10:**

Illustration til placering af teksturprofiler i forhold til centerlinjerne og opdeling i del-afsnit.



Figur 7.11:

Eksempel på normeret x-z teksturprofil for et del-afsnit på 91,98 mm (Vær opmærksom på den store forskel på de to akser enheder; x-aksen er presset meget sammen i forhold til y-aksen).

Alle disse del-afsnit er sidenhen blevet normeret ved nul-punktsundertrykning og korrektion for en eventuel hældning af det enkelte del-afsnit. Det betyder, at middelværdien af hvert enkelt del-afsnit er nul, og enhver skævhed, som kunne have sin årsag i placeringen af pladen under måling i forhold til referencen for den højopløselige laser-måling, er fjernet. Figur 7.11 viser, hvordan et normeret z-profil kan se ud. Vær opmærksom på, at x-aksen er presset meget sammen i forhold til y-aksen.

Variansanalyse på teksturprofildata

Der er udført varians-analyse af parametre for teksturprofiler målt på indtromlede prøver af tynde støjreducerende slidlag. Prøverne af de tre asfaltmaterialer er beregnet til Wheel Tracking Test udført i forskellige højder. Den seksidede variansanalyse udføres med hensyn til vurdering af 1. ordens effekter og 2. ordens vekselvirkninger. Faktorerne i variansanalysen er:

- Faktor A: Asfalt
 - SV12564 SMA 8 (optimeret)
 - SV13734 SMA 6 (optimeret)
 - SV14289 SMA 8 (SRS)
- Faktor B: Plade
 - Plade A – repræsenterende 1. indtromlede prøveplade
 - Plade B – repræsenterende 2. indtromlede prøveplade
- Faktor C: Højde
 - Tilstræbt pladehøjde på 29 mm ved indtromling
 - Tilstræbt pladehøjde på 38 mm ved indtromling
 - Tilstræbt pladehøjde på 58 mm ved indtromling
- Faktor D: Del-afsnit (se figur 7.10)

- Hvert profil er ca. 275,9 mm langt og opdelt i tre successive delafsnit betegnet 1, 2 og 3
- Faktor E: Position (se figur 7.10)
 - +50 mm i forhold til pladens centerlinje
 - pladens centerlinje (angivet som 0 mm)
 - -50 mm i forhold til pladens centerlinje
- Faktor F: Tromleretning (se figur 7.10)
 - 0 ° i forhold til tromleretningen
 - 90 ° i forhold til tromleretningen

Der er i denne variansanalyse ikke taget hensyn til den bestemte komprimeringsgrad af hele pladen som covariant i forhold til den tilstræbte, da de små afvigelser p.t. ikke anses at være betydende for den opnåede overfladetekstur, mens det ved den tidligere variansanalyse for deformationsegenskaberne under det langvarige, mekanisk belastede sporkøringsforsøg vides at kunne have en indflydelse på tolkningen.

Parametrene, som de seks faktorer indflydelse undersøges for, er:

- Varians Stikprøvevarians af del-afsnittet
- Stdafv stikprøvestandardafvigelse af del-afsnittet
- Min Del-afsnittets mindste værdi for z-profilet
- Max Del-afsnittets største værdi for z-profilet
- Interval Forskellen mellem største og mindste værdi for del-afsnittet
- Skewness Skævheden af del-afsnittets fordeling
- Kurtosis Kurtosis (momentet) af del-afsnittets fordeling

- Z_RMS Effektværdien af del-afsnittet (roden af den gennemsnitlige kvadratsum)
- Fraktil_01 1 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_05 5 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_10 10 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_25 25 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_50 50 % fraktilen af del-afsnittet (medianen)
- Fraktil_75 75 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_90 90 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_95 95 % fraktilen af del-afsnittet
- Fraktil_99 99 % fraktilen af del-afsnittet

Der skal knyttes nogle bemærkninger til valg af faktorer og parametre:

1. Opdelingen af det 305 mm lange tekstur råprofil i tre del-afsnit af 91,98 mm i stedet for ét teksturprofil på 193,6 mm (svarende til 210 datapunkter) er valgt dels for at analysere en større del af det samlede teks-turprofil, dels give mulighed for en analyse af praktiske forhold ved fremstillingen af prøven. Når prøveformen fyldes, hældes den afvejede varme asfalt ned midt i formen (primært i den kvadrat, der udgøres af del-afsnit 2 – se figur 7.10), hvorefter materialet fordeles, inden tromling udføres. Det betyder, at der kunne tænkes at være afvigende karakteristika for den centralplacerede "1/9" af pladen i forhold til de omkringliggende "8/9".
2. En eventuel forskel i sideværts fordeling af materialet tænkes identificeret med faktoren E (Position).
3. Selv om fordelingen af den løse asfalt inden komprimering antages at være arbitrær i forhold til prøvens hovedretninger, så tilfører tromlingen med et cylindrisk tromlesegment en orientering, som for teksturen kunne tænkes at være meget betydende; nemlig hvordan orienterer tromling eventuelt stenkornenes placering i overfladen? Hvis det nævnte fænomen skulle have en signifikant betydning, burde det dukke op i en vekselvirkning mellem Faktor F (tromleretning) og Faktor D (Del-afsnit).
4. Tromlingen vides også at kunne give bølgede profiler i tromleretning, hvis den udføres forkert; f.eks. hvis det sættes for højt tromletryk på i en yderstilling for tidligt i forløbet. Opdelingen i del-afsnit, som efterfølgende er blevet normeret (korrigeret for nulpunkt og hældning), gør, at det ikke direkte kan " aflæses " af

profilerne. Hvis det nævnte fænomen skulle have en signifikant betydning, burde det dukke op i en vekselvirkning mellem Faktor F (tromleretning) og Faktor E (Position), da teksturen på tværs af tromleretningen så måtte være forskellig fra teksturen i profilerne med tromleretningen.

5. Parametrene Skewness, Kurtosis og Z_RMS benyttes ofte til at beskrive karakteristika ved fordelinger.
6. De forskellige valgte fraktiler af den normerede z-profil er medtaget for at beskrive, om der fortrinsvis er "toppe" eller "dale", dvs. bidrage til en vurdering af, om z-profilet er overvejende konkavt eller konvekst. Da medianen (50 % fraktilen) er positiv for alle de normerede z-profiler, kan det allerede nu afgøres, at alle belægningsprøver har en konveks overfladestruktur.

Resultaterne fra den sekssidede variansanalyse er samlet i tabel 7.4, hvor de fundne hovedvirkninger (1. ordens effekter) og vekselvirkninger (2. ordens effekter) er samlet. Effekterne er rangordnet for hver parameter efter deres signifikans bestemt ved variansanalyse på følgende måde:

- Stærk signifikans $P \leq 0,0010$
- Signifikans $0,0100 \geq P > 0,0010$
- Svag signifikans $0,0500 \geq P > 0,0100$

Hovedeffekter ved variansanalysen på teksturprofiler

For de 17 undersøgte parametre for teksturprofilerne er det de samme to faktorer, der går igen som havende stærk signifikant indflydelse. Der er Faktor C: Højde af pladen (i 14 tilfælde) og Faktor A: Asfalt (i 12 tilfælde). Hvis begge faktorer forekommer som stærk signifikante, vil Faktor C: Højde af pladen i 8 ud af 12 tilfælde være mere dominerende end Faktor A: Asfalt. I de to tilfælde, hvor Faktor C: Højde af pladen forekommer som stærk signifikant alene, er Faktor A: Asfalt tilstede på signifikant niveau. Det er logisk, at asfaltmaterialet har en indflydelse på det målte teksturprofil, men det er overraskende, at højden af den laboratoriekomprimerede asfaltplade har så tydelig indflydelse på den opnåede tekstur. Der kan dog intet siges, om der vil være den samme betydning for overfladeteksturen på fuldskala udlagte tynde støjreducerende slidlag. Her vil trafikken efter de første par måneder have slidt bitumenmørtlen bort, som stadig findes på de målte, laboratoriefremstillede plader. Hvis effekten af lagtykkelsen til gengæld også er betydende ved normal slidlagsudlægning, vil det indikere et yderligere element af variation i teksturen som følge af variationer i lagtykkelse på langs og på tværs af kørebaneprofilet.

Af andre hovedeffekter, som har signifikant betydning, er der to faktorer; Faktor E: position på pladen og Faktor B: Plade nr. 1 eller nr. 2. Sidstnævnte effekt ses kun for

en eneste parameter, 25 % fraktilen, men Faktor B som hovedeffekt forekommer ikke med svag signifikant betydning for nogen af den andre 16 parametre. Derfor må betydningen af plade nr. 1 eller nr. 2 for denne parameter nærmest være en tilfældighed.

Faktor E: position på pladen forekommer ved tre parametre som signifikant og ved andre seks parametre som svagt signifikant. Som tidligere nævnt kan dette resultat være en indikation på, at det har betydning, hvordan det løstpakkede asfaltermateriale fordeles i formen inden tromling. Der bør derfor i fremtiden være fokus på det procestrin i prøvningen, hvor den afvejede asfaltermængde hældes i formen og fordeles:

- Faktor A: Asfalt
- Faktor B: Plade
- Faktor C: Højde
- Faktor D: Del-afsnit
- Faktor E: Position
- Faktor F: Tromleretning

Den sidste faktor, som har vist en hovedeffekt, er D: Del-afsnit, som forekommer ved fire ud af 17 parametre med en svag signifikans. For tre af disse fire tilfælde er signifikansen meget tæt på grænsen $P = 0,05$, hvor effekten slet ikke ville være blevet regnet med. Isoleret set afspejler det nok igen forhold omkring fordeling af asfalten i formen inden tromling. Derimod har faktoren større betydning i flere vekselvirkninger, som bliver diskuteret i det følgende.

Vekselvirkninger ved variansanalysen på teksturprofiler

Der er fundet i alt 29 parvise vekselvirkninger ved variansanalysen, hvor seks er signifikante og 23 er svagt signifikante. Der er ingen stærkt signifikante vekselvirkninger. Den hyppigst forekommende af de 29 vekselvirkninger er mellem Faktor A: Asfalt og Faktor C: Højde af pladen, som også var de to faktorer, der viste sig at have stærk signifikant effekt på de fleste af de undersøgte parametre. Asfalternes teksturprofil lader sig altså påvirke forskelligt af variationer i udlægningstykkelser.

Der er syv vekselvirkninger (to signifikante og fem svagt signifikante) mellem Faktor B: Plade og Faktor C: Højden af pladen. De to signifikante vekselvirkninger forekommer ved parametrene 5 % fraktilen og 95 % fraktilen. Vekselvirkningen mellem de to faktorer påvirker altså yderpunkterne af teksturprofilerne. Det har egentlig været ønskværdigt, at variansanalysen ikke havde vist nogen som helst indflydelse af Faktor B: Plade, da det afspejler forskel på de to indtromlede plader af samme materiale. Det er næsten også tilfældet, da Faktor B: Plade som

hovedeffekt kun påvirker parameteren 25 % fraktilen af teksturprofilen. Det har været vurderet indledningsvis, at en eventuel forskel mellem pladerne mere sandsynligt ville hidrøre fra komprimeringen end fra den korte, ekstra tid, som materialet til plade nr. 2 opholder sig ved komprimeringstemperaturen, som går til komprimeringen af plade nr. 1. Denne vurdering fastholdes, og vekselvirkningen tolkes snarere som, at erfaring fra komprimeringen af plade nr. 1 har lidt indflydelse på, hvordan plade nr. 2 komprimeres.

Der er tre vekselvirkninger mellem Faktor D: Del-afsnit og Faktor E: Position (to signifikante og en svagt signifikant). Denne vekselvirkning forekommer ved parametrene for teksturprofilernes min- og max-værdier og har klart noget med fordelingen af materiale i formen at gøre, inden komprimeringen udføres.

Der er en signifikant vekselvirkning mellem Faktor B: Plade og Faktor E: Position for en enkelt parameter, 25 % fraktilen. Der er ikke pt. nogen forklaring på, hvorfor 25 % fraktilen som den eneste af de undersøgte parametre har en signifikant effekt fra Faktor B: Plade og samtidig en signifikant vekselvirkning med teksturprofilernes placering. Tolkningen er, at det må have relation til materialehåndtering og komprimering, men det er uklart, hvorfor det giver sig udslag ved teksturprofilernes 25 % fraktil. Dette fraktilniveau topper også variansanalysen med fire hovedvirkninger og fire vekselvirkninger. Derfor bør denne parameter holdes under observation ved fremtidige teksturprofilmålinger på laboratorieindtromlede plader for at afklare, om effekten har været tilfældig, eller om netop dette niveau kan bruges som en særlig beskrivende størrelse ved differentiering mellem forskellige asfaltermaterialers tekstur.

Vekselvirkningen CD for faktorerne Højde og Del-afsnit forekommer på svagt signifikant niveau for tre af fraktilerne for teksturprofilerne (10 %, 25 % og 99 %). Der er formentlig et udslag af fordelingen af asfaltermaterialet i formen inden komprimering.

De sidste, fem vekselvirkninger (AD, BF, CE, CF og DF) er alle svagt signifikante og forekommer, hver især kun for én parameter. Tre af disse involverer Faktor F: Tromleretning og understreger, at selv om der skal være fokus på fordelingen af det løst pakkede asfaltermateriale før komprimering, kan der godt være en materialespecifik indflydelse på, hvordan materialet lader sig pakke og orientere. Der er ingen hovedvirkning fra Faktor F: Tromleretning, men de tre nævnte vekselvirkninger findes for 5 %, 25 % og 99 % fraktilerne, hvilket næsten er parametersammenfald med den tidligere omtalte vekselvirkning CD for Højde og Del-afsnit.

Den svagt signifikante vekselvirkning CE mellem Faktor C: Højde og Faktor E: Position er den eneste effekt, der er fundet for parameteren Skewness; dvs. om fordeling af teksturprofilen er skævt. Der er altså en indflydelse fra

Parameter	Stærk signifikant effekt	Signifikant effekt	Svag signifikant effekt
Varians	C (P = 0,0000) A (P = 0,0003)		E (P = 0,0171) AC (P = 0,0219) BC (P = 0,0377) D (P = 0,0451)
Stdafv	C (P = 0,0000) A(P = 0,0000)	E (P = 0,0094)	BC (P = 0,0154) AC(P = 0,0207) D (P = 0,0391)
Min	A (P = 0,0000) C (P = 0,0006)		DE (P = 0,0467)
Max	A (P = 0,0000) C (P = 0,0000)	DE (P = 0,0043) E(P = 0,0093)	D(P = 0,0101) AC(P = 0,0414) BC (P = 0,0450)
Interval	A (P = 0,0000) C (P = 0,0000)	DE (P = 0,0052)	E (P = 0,0216) AD (P = 0,0239) AC (P = 0,0288)
Skewness			CE (P = 0,0290)
Kurtosis			A (P = 0,0162)
Z_RMS	C (P = 0,0000) A (P = 0,0000)	E (P = 0,0094)	BC (P = 0,0154) AC (P = 0,0207)
Fraktil_01	C (P = 0,0000)	A (P = 0,0060)	
Fraktil_05	C (P = 0,0000)	A (P = 0,0053)	E (P = 0,0334) BF(P = 0,0353)
Fraktil_10	C (P = 0,0000) A (P = 0,0006)	BC (P = 0,0068)	CD (P = 0,0384) AC (P = 0,0439)
Fraktil_25	A(P = 0,0000) C (P = 0,0001)	BE (P = 0,0032) B (P = 0,0053)	AC (P = 0,0105) E (P = 0,0199) CF (P = 0,0207) CD (P = 0,0396)
Fraktil_50			A (P = 0,0135) C (P = 0,0165)
Fraktil_75	C(P = 0,0000) A (P = 0,0001)		AC(P = 0,0203)
Fraktil_90	C (P = 0,0000) A (P = 0,0001)	AC (P = 0,0020)	D (P = 0,0493)
Fraktil_95	C(P = 0,0000) A(P = 0,0000)	BC(P = 0,0045)	E(P = 0,0289)
Fraktil_99	C(P = 0,0000) A	(P = 0,0000)	E (P = 0,0111) CD (P = 0,0329) DF (P = 0,0385) BC (P = 0,0391) AC (P = 0,0399)

Tabel 7.4:

Resultat af sekssidet variansanalyse med opdeling i hoved- og vekselvirkninger i deres grad af signifikans.

mængden af materiale, der hældes i formen og fordelingen af det, siden der opstår en svag vekselvirkning med positionen af teksturprofilen. Modsætningsvis kan det sluttes, at de normerede teksturprofiler for de tre undersøgte asfaltmaterialer er tilstrækkeligt symmetriske til, at en beregnet parameter som Skewness næsten ikke har betydning af karakteriseringen af teksturprofilerne.

Planslib af en udvalgt prøve

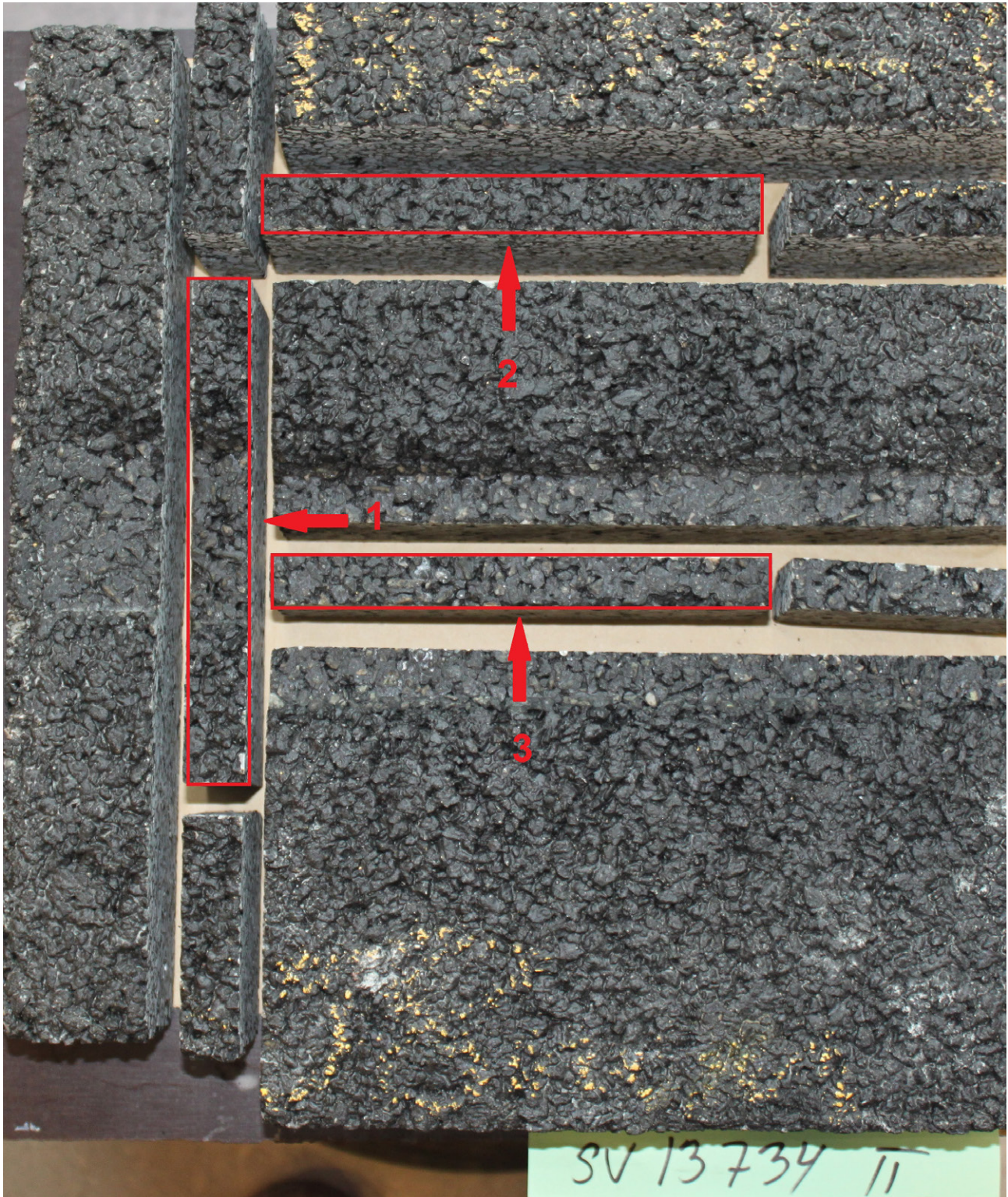
Der er udvalgt en plade af SV 13734 SMA 6 (optimeret) (58 mm, plade B) til planslibsundersøgelse, som i henhold til spørkøringsbestemmelsen i tabel 7.2 gav en deformation i køresporets centerpunkt på 5,45 mm. I

figur 7.12 vises, hvordan prøveplade er skåret op efter de retningslinjer, som blev angivet i figur 7.5. De indrammende belægningsstykker er brugt til de følgende figurer, og en pil anviser, hvilken af siderne, som vises i figur 7.13 til figur 7.18.

Belysningen med kombinationen af UV og hvidt lys benyttes specielt til at fremhæve stenmaterialets lejring, mens belysning med UV lys alene fremhæver hulrumstrukturen. Udgangspunktet for vurderingen er figur 7.15 og figur 7.16, som er det bedste bud på strukturen for en ubelastet prøve.

Ved undersøgelse af tværprofilet, hvor den maksimale deformation forekommer, kan det ved sammenligning af figur 7.15 og figur 7.16 med figur 7.13 og figur 7.14 respektive ses, at deformationen i materialet synes at mindske størrelsen af hulrumsporerne under det belastede flader, men måske mere vigtigt, at der på grund

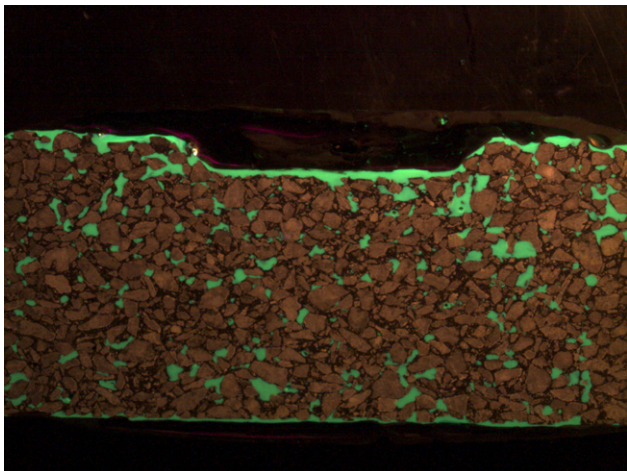
af forskydninger i materialet opstår et forøget hulrum i en perlerække udstrålende i ca. 45° fra kanten af det belastede tværprofil. Den effekt vil selvfølgelig specielt forekomme, når det belastede hjul kører i et fast spor (kærv-virkning), mens det ikke vil være ligeså tydeligt, hvis der var en randomiseret, tværmæssig fordeling af



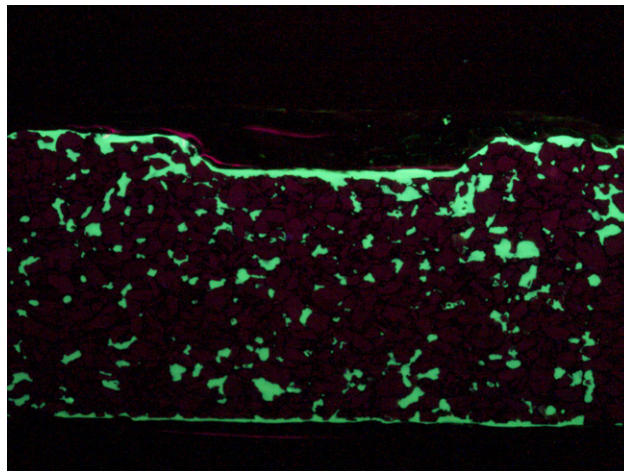
Figur 7.12:

SMA 6 (optimeret) opskåret til planslib af de indrammede dele i henhold til figur 7-5. Pilene viser den betragtede flade. 1 = tværprofil; 2 = udenfor belastet spor; 3 = centralt i belastet spor.

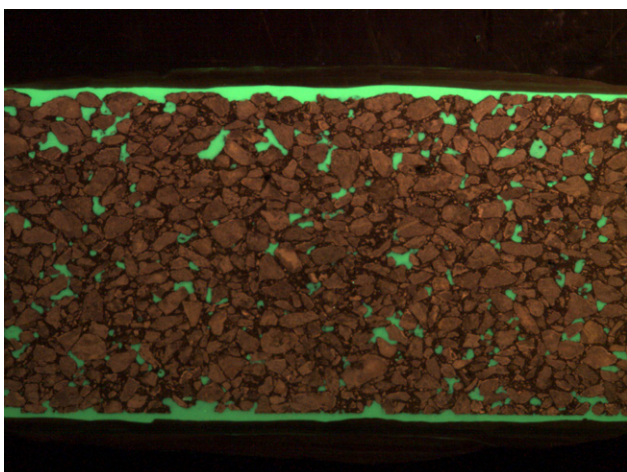
Planslib af SV 13734 (plade B, 58 mm) SMA 6 (optimeret).
Længden af figur 7.13 til figur 7.18 er ca. 150 mm.



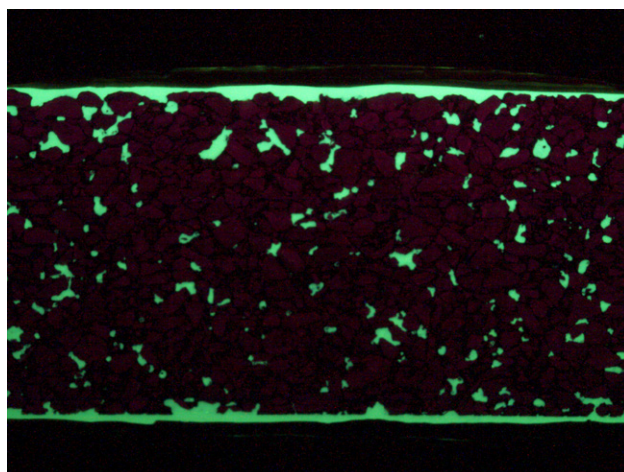
Figur 7.13:
Tværprofil (1) i UV og hvidt lys.



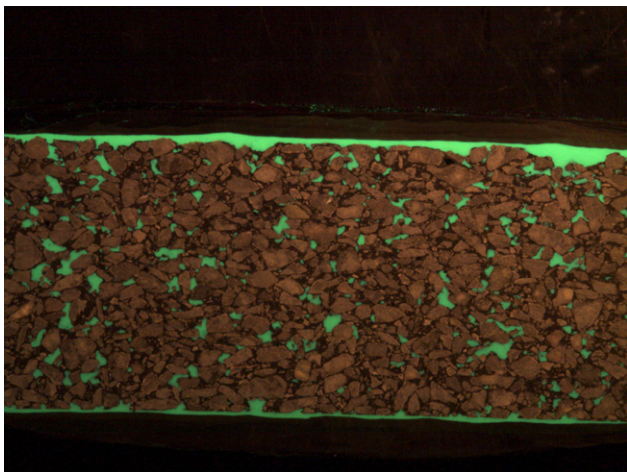
Figur 7.14:
Tværprofil (1) i UV lys.



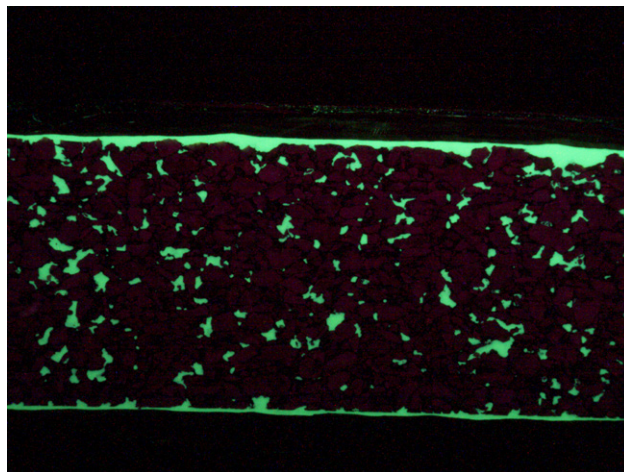
Figur 7.15:
Længdeprofil udenfor belastet spor (2) i UV og hvidt lys.



Figur 7.16:
Længdeprofil udenfor belastet spor (2) i UV lys.



Figur 7.17:
Længdeprofil centralt i belastet spor (3) i UV og hvidt lys.



Figur 7.18:
Længdeprofil centralt i belastet spor (3) i UV lys.

belastningen, som det f.eks. kendes fra sporkøringsmaskinens fuldskala belastning [43]. Til gengæld illustrerer perlerækken af hulrum under 45 ° fra kanten af det belastede hjul placering af de forskydningskræfter, som kan beregninger kan vise, at der til eksempel opstår i kanten af et supersingle-dæk lidt nede i belægningen [12], som netop er baggrunden for nødvendigheden af asfaltbinde-derlag på svært trafikerede veje.

Ved sammenligning med figur 7.17 og figur 7.18 kan det visuelt vurderes, at hulrummene i det belastede spor er blevet mindre, men der er ikke nogen synlige tegn på ændringer i stenstrukturen (dvs. ændret orientering af sten-kornene eller forskydning af materialet).

Disse vurderinger er denne sammenhæng tænkt som ledsagende illustration, og er begrænset til visuelle vurderinger på et beskedent data grundlag, men det viser, at teknikken med planslib har et potentiale til også at kunne benyttes til forsøg, hvor materialets struktur kunne være interessant at følge under udvikling/optimering af en mix design for et nyt asfaltmateriale.

7.5 Konklusioner og perspektiv

På tre forskellige, støjreducerende asfaltmaterialer, som repræsenterer nominel maksimalkornstørrelse 6 og 8 mm, er der:

- blevet indtromlet prøveplader i tre forskellige højder (29 mm, 38 mm og 58 mm)
- blevet målt teksturprofiler med laser med høj opløsning, hvorefter
- der er blevet udført sporkøringsforsøg ved 50 °C

Sporkøringsforsøgene er bestemt efter Wheel Tracking Test DS/EN 12697-22 Model B i vand, hvor der i forhold til asfaltproducentens specifikation ved komprimeringen af prøvepladerne er tilstræbt en komprimeringsgrad på 97,5 %. Den reelle komprimeringsgrad er vurderet på baggrund af asfaltdensitetsbestemmelse på hele prøvepladen før test.

De tre undersøgte asfaltmaterialer er kun en stikprøve, hvilket skal tages i betragtning ved vurderingen af de nedenstående konklusioner

Der er udført variansanalyser på baggrund af de fremkomne data, hvorfra der kan drages følgende konklusioner:

- Sporkøringsforsøg:

1. Variansanalysen viser, at pladehøjden har en signifikant indflydelse på deformationen efter 5.000 belastningscykler, men hvis den målte komprimeringsgrad indsættes som covariant, så forsvinder indflydelsen af højden.

2. Variansanalysen viser, at:

- pladehøjden har en signifikant indflydelse og
- asfaltmaterialet næsten har en svag signifikant indflydelse ($P = 0,0533$) på deformationen efter 10.000 belastningscykler. Hvis den målte komprimeringsgrad indsættes som covariant, så forsvinder indflydelsen fra begge faktorer.

3. Variansanalysen viser, at både pladehøjden og asfaltmaterialet har en svag signifikant indflydelse på Wheel Tracking Rate (WTR; hældningen af sporkøringen mellem 5.000 og 10.000 belastningscykler). Hvis den målte komprimeringsgrad indsættes som covariant, er det kun asfaltmaterialet, som opretholder en svag signifikant indflydelse på Wheel Tracking Rate.

4. Forsøgene indikerer, at de tre asfaltmaterialer med nominel maksimalkornstørrelse på 6 og 8 mm kan udlægges i velkomprimerede lagtykkelser større end "tommelfinger"-reglens 4,0 x maksimalkornstørrelse uden nævneværdig ekstra risiko for sporkøring under de givne forhold (50 °C).

- Teksturprofiler (del-profiler normeret for hældning og nulpunkt):

5. Det antages – ud fra en visuel vurdering – at overflade-teksturen af asfaltpladerne ikke er påvirket af de små ændringer i komprimeringsgrad (til forskel fra situationen ved det mekanisk belastede sporkøringsforsøg).

6. De undersøgte teksturprofiler for de tre asfaltoverflader viser, at tekturen er konveks, da medianen (50 % fraktilen) for alle teksturprofiler er større end 0 mm.

7. Den seksidede variansanalyse er udført for følgende faktorer:

- Asfaltmateriale (tre støjreducerende slidlagsmaterialer)
- Plade (A eller B)
- Pladehøjde (29 mm, 38 mm og 58 mm)
- Del-afsnit af pladens sidelængde
- Position af profil (centerlinje eller ± 50 mm)
- Tromleretning (0 ° eller 90 °)

8. Det skal erindres i forhold til de målte teksturprofiler, at overfladen på de laboratoriekomprimerede asfaltplader stadig er dækket af den bitumenmørtel,

som ude på vejen vil blive slidt af i løbet af de første måneder under trafik.

9. Asfaltmateriale og pladehøjde har en stærk signifikant indflydelse på følgende parametre for teksturprofilerne

- varians (stikprøve),
- standardafvigelse (stikprøve),
- minimum
- maksimum og
- interval (dvs. maksimum – minimum)

10. Asfaltmateriale og pladehøjde har en (overvejende stærk) signifikant indflydelse på følgende fraktiler for teksturprofilerne

- 1 %, 5 %, 10 %, 25 %, 75 %, 90 %, 95 % og 99 %
- På meridianen (50 % fraktil) dog kun svag signifikant indflydelse.

11. Værdien af teksturprofilernes Root-Mean-Square er påvirket af en stærk signifikant effekt fra asfaltmaterialet og fra pladehøjden samt en signifikant effekt af profilets position i forhold til centerlinjen.

12. Teksturprofilernes karakteristika i form af skewness og kurtosis har begge kun én svag signifikant indflydelse ved variansanalysen (hhv. en vekselvirkning mellem pladehøjde og position og en effekt af asfaltmaterialet).

13. Der er fundet adskillige (primært svagt signifikante) vekselvirkninger mellem de undersøgte faktorer, som indikerer at fordelingen af det løst pakkede asfaltmateriale inden komprimering har betydning for den opnåede tekstur.

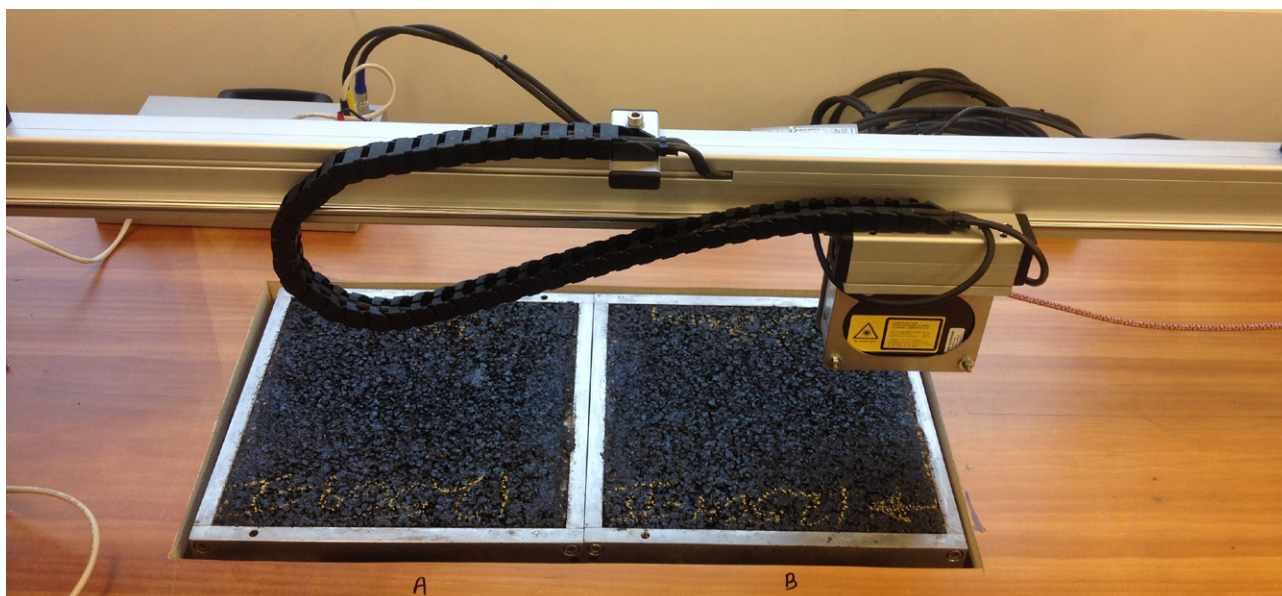
14. Det er bemærkelsesværdigt, at der er en stærk signifikant indflydelse af pladens højde på tekturen, mens der ikke er nogen effekt af tromleretning.

Disse sporkørings- og teksturundersøgelser vil så vidt muligt blive fulgt op i fremtiden, da det er interessant at sammenligne med andre asfaltmaterialer (støjreducerende og ikke-støjreducerende), samt at sammenholde de fundne effekter med måleresultater af teksturprofiler fra aktuelle strækninger, hvor trafikken over tid dels har slidt bitumenmørtlen af dels for visse asfalttyper måske påvirket tekturen gennem slid eller anden påvirkning af stenlejringen.

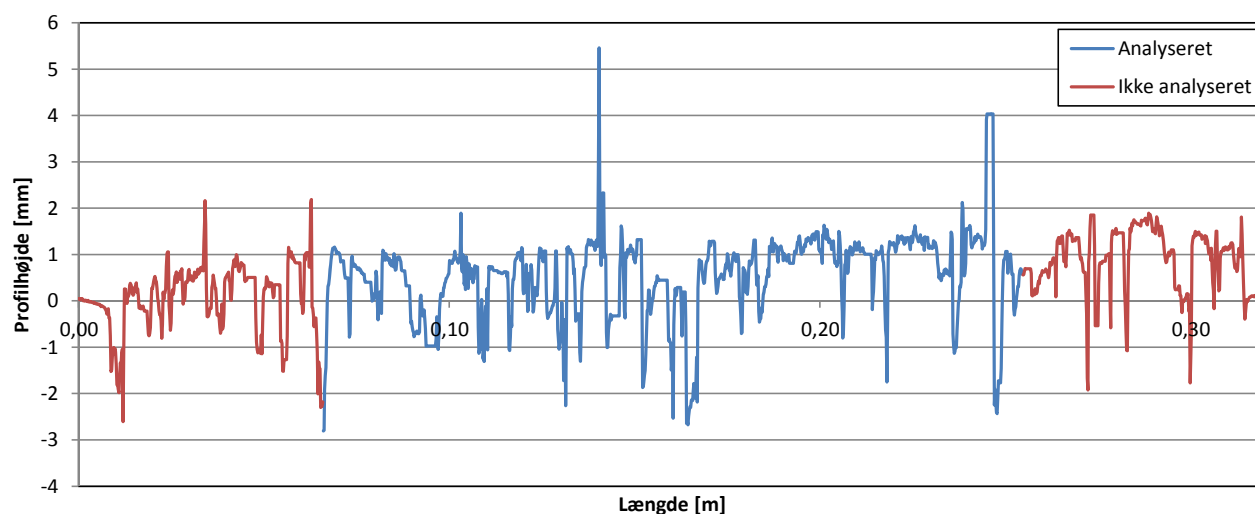
8. Teksturmålinger på prøveplader

I forrige kapitel er det beskrevet, hvordan teksturmålinger på prøvepladerne er udført og statistisk analyseret inden sporkøringsforsøgene blev foretaget. I dette kapitel er der foretaget spektralanalyser af disse teksturmålinger. Sporkøringsforsøgene er foretaget for at undersøge, om det er muligt at producere tykkere belægninger, uden at dette medfører øget sporkøring. Det er intentionen, at

sporkøringsforsøgene i Hamborg sporkøringsapparatet [41] skal bruges til at udføre forskellige optimeringstests af f.eks. støjreducerende slidlag. Når apparatet skal bruges til foretage optimeringsforsøg af de strukturelle egenskaber af belægningerne, er det også relevant at kunne beskrive de forventede akustiske egenskaber af belægningerne. For at kunne beskrive disse egenskaber



Figur 8.1:
Måleopstilling ved teksturmåling af prøveplader med in-situ-TEX måleudstyret.



Figur 8.2:
Teksturprofil af én testplade inklusiv kanterne af formene, hvori prøvepladerne er produceret. Den blå del af profilet illustrerer, hvilken del af profilet der bliver udvalgt til analyser.

måles overfladenstekstur og der foretages analyser af teksturspektre. Figur 8.1 viser måleopstillingen ved teksturmålingerne af prøveplader med in-situ-TEX måleudstyret (se evt. afsnit 5.2).

For at kunne beskrive så lange bølgelængder som muligt, anvendes der 1.048 samples, hvilket svarer til 18,86 cm af pladen, hvis fulde længde er 30,5 cm. For at undgå uregelmæssigheder i udkanten af prøvepladerne, analyseres teksturspektrene i midten af pladen. Figur 8.2 viser et eksempel på, hvilken del af et teksturprofil, der bliver foretaget spektralanalyse på.

For hver belægning er der produceret to prøveplader kaldet A og B. Spektralanalysen er foretaget på de samme teksturprofiler som i det foregående kapitel 7 – dvs. midten af en prøveplade – samt ± 50 mm til hver side. Dette er foretaget på både delprøve A og B i og på tværs af tromleretningen. Der vil altså være seks teksturspektre pr. type prøve i og på tværs af tromleretningen. Et spekter for middelværdien af både i og på tværs af tromleretningen, vil derved være en middelværdi af tolv spektre.

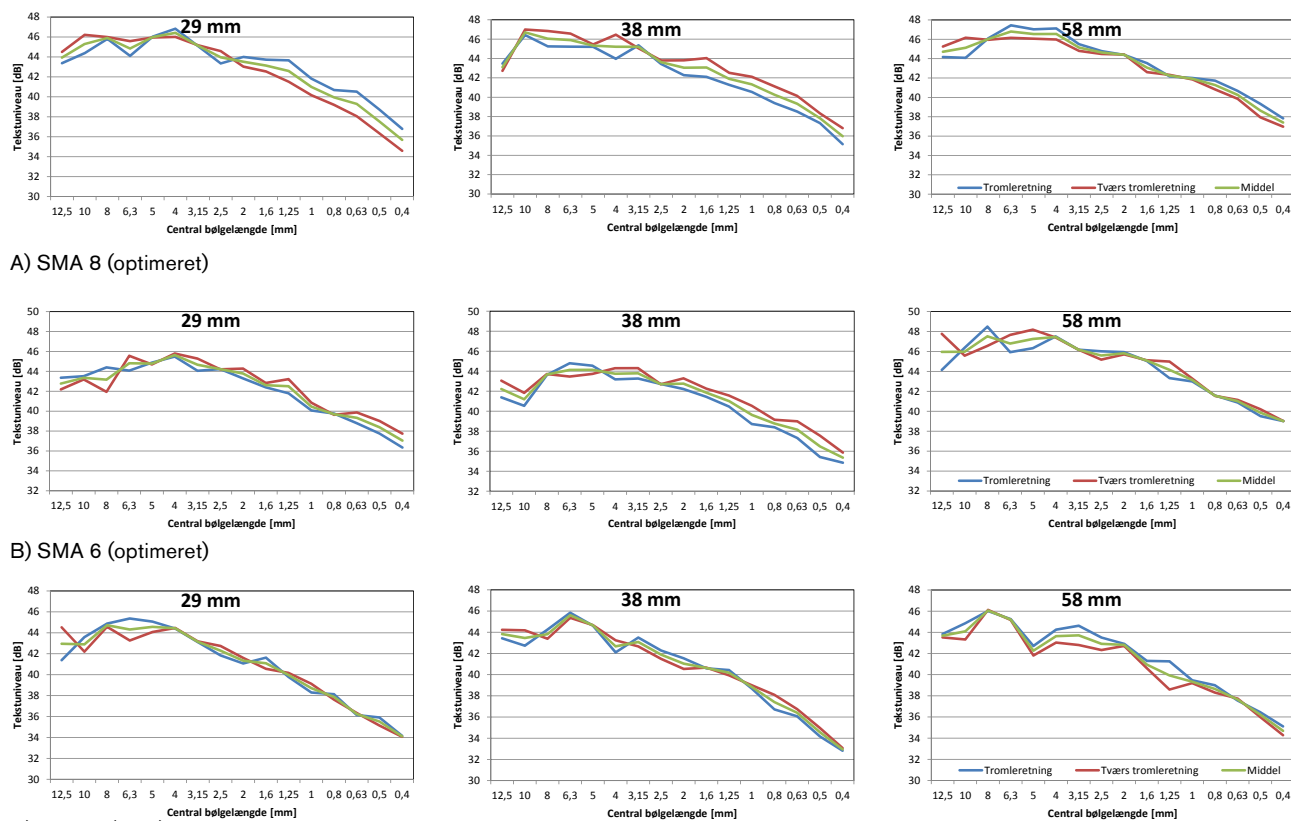
8.1 Tromleretningens indflydelse på teksturspektre

Metoden, hvormed at testpladen komprimeres (tromles), afviger fra tromlingen af en vejbane. Det kunne være relevant at undersøge om der er forskel på tekturen i og på

tværs af tromleretningen. De statistiske analyser af tromleretningens indflydelse på teksturprofilerne i foregående kapitel 7 viste ingen effekt på teksturprofilerne. Hvis der ligeledes ikke ses nogen forskel på teksturspektrene i og på tværs af tromleretningen, vil anvendelsen af en middelværdi af begge retninger kunne minimere effekten af eventuelle uregelmæssige teksturprofiler. En middelværdi af flere end seks teksturprofiler kan desuden anvendes til at adskille teksturspektre fra forskellige prøveplader fra hinanden. Figur 8.3 illustrerer teksturprofilerne i og på tværs af tromleretningen, samt middelværdien af begge retninger for de tre belægningstyper og højder. Spektrene på figurene viser, at der ikke er nogen tendens til at teksturspektrene for enten i eller på tværs af tromleretningen har højere tekturniveauer end den anden retning. Middelværdien for alle 2x6 teksturspektre pr. prøvepladesæt kan derved bruges til at beskrive teksturspektret, for den pågældende tykkelse af denne belægning.

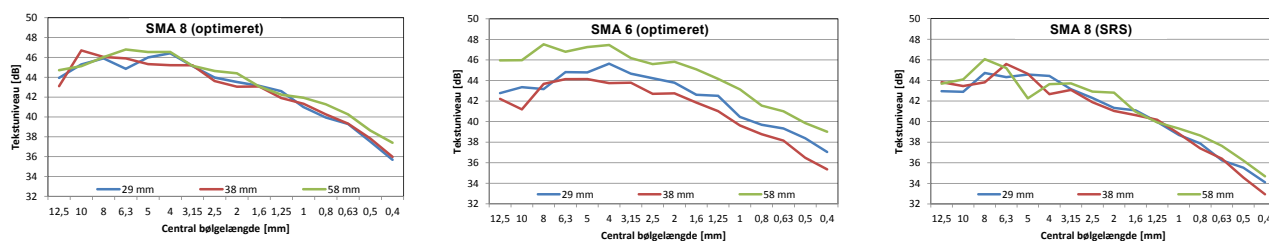
8.2 Sammenligning med spektre fra veje

Sporkøringsforsøgene i kapitel 7 indikerer, at det er muligt at forøge lagtykkelsen af belægningerne, uden at der opstår øget tendens til sporkøring. Det vil derfor være relevant at se på, om den forøgede tykkelse resulterer i en forandring af overfladetekturen af pladerne, som evt. kunne have en betydning for støjen. På figur 8.4 illustreres de gennemsnitlige teksturspektre for de forskellige testtykkelser, for hver af de tre belægningstyper. For



Figur 8.3: Teksturspektre for A) SMA 8 (optimeret), B) SMA 6 (optimeret) og C) SMA 8 (SRS), i tromleretningen (blå kurver), på tværs af tromleretningen (røde kurver) samt gennemsnit af de to foregående (grønne kurver), for pladetykkelserne 29, 38 og 58 mm.

8. Teksturmålinger på prøveplader



Figur 8.4:

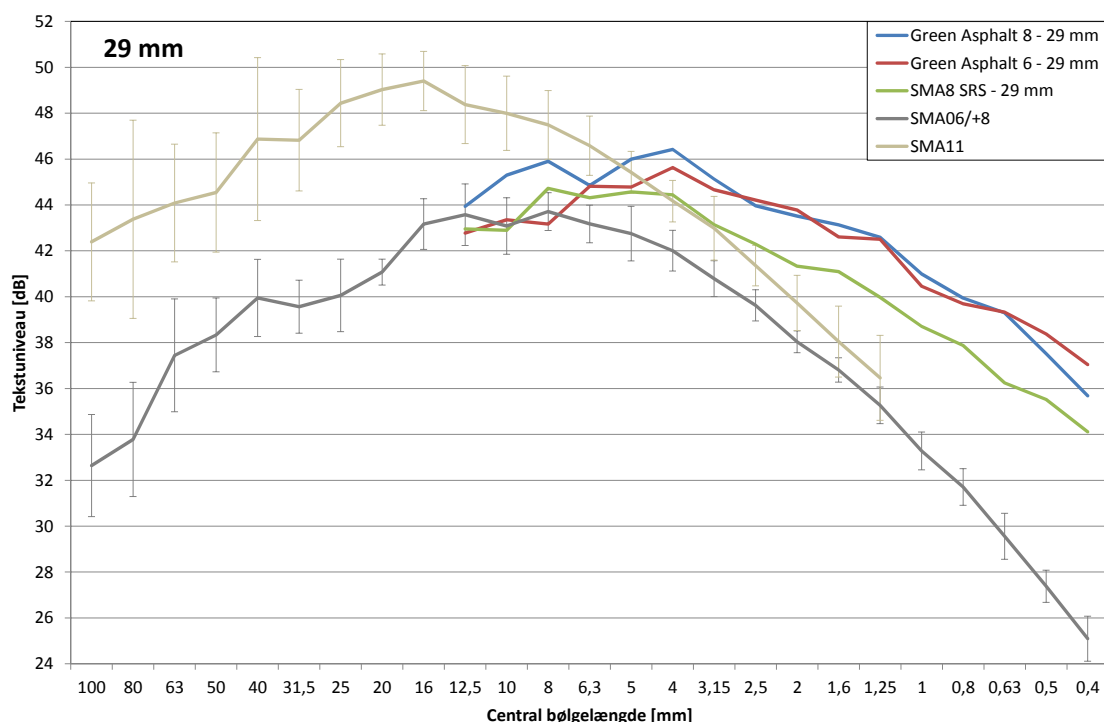
Gennemsnitlige teksturspektre for hhv. 29 (blå kurver), 38 (røde kurver) og 58 mm testplader (grønne kurver), for SMA 8 (optimeret), SMA 6 (optimeret) og SMA 8 (SRS).

SMA 8 (optimeret) og SMA 8 (SRS) er der ingen reel forskel på spektrene i de forskellige pladetykkelser. For SMA 6 (optimeret) afviger teksturspektret for 58 mm pladen betydeligt fra de andre. Spektret er generelt højere i alle niveauer, og hvis der antages at dette også vil være gældende ved længere bølglængder, vil belægningen ifølge Estimated Road Noisiness Level (se afsnit 5.1) være mere støjende end de tyndere belægninger. Dette forekommer kun for netop denne belægningstype ved denne tykkelse, hvorfor det må formodes at det skyldes udfordringer med komprimeringen af pladen. For de to andre belægninger må det vurderes, at tekturen ved pladerne af forskellig tykkelse ikke medfører ændringer af støjniveauerne.

De testede belægningstyper er alle tre af typen SMA og afviger relativt lidt fra hinanden, hvorfor det må antages, at der ikke vil være store afvigelser mellem de forskellige spektre. Figur 8.5 illustrerer teksturspektrene for de tre forskellige højder af testplader for de tre belægningstyper. Disse tre SMA-belægninger er desuden udlagt på rigtige vejstrækninger med almindeligt udlægningsudstyr.

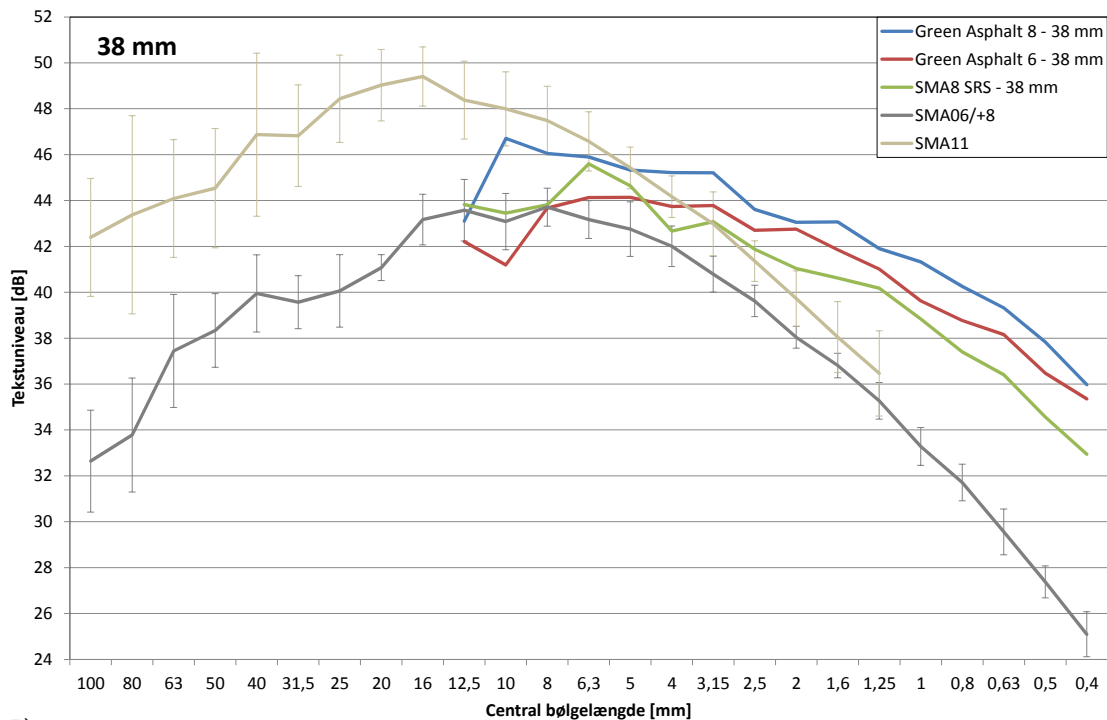
Der er ligeledes foretaget teksturmålinger på disse belægninger og resultaterne er medtaget i figur 8.5.

Det ses generelt på figur 8.5, at teksturniveauerne for SMA 8 (SRS) er lavere end de to optimerede SMA-belægninger. Der ses desuden, at teksturniveauerne for prøvepladerne afviger fra de to belægninger udlagt på en rigtig vej, ved de korte bølglængder fra 3,15 til 0,4 mm. Tendensen for området 12,5-4 mm er i højere grad spektrene for prøvepladerne krydser spektrene fra de rigtige veje. Dette ses tydeligt ved at spektrene fra prøvepladerne kun er inden for vejbelægningernes standardafvigelse ved op til tre bølglængder. Årsagen til denne forskel mellem spektrene fra prøvepladerne og vejbelægningerne er endnu ukendt, men kan muligvis skyldes forskel på komprimeringsmetoderne i laboratoriet og på vejen. Der skal dog bemærkes, at prøvepladerne ser ud til at have en maksimalværdi i området 6,3-4 mm for at blive lavere i området fra 8 til 12,5 mm. Denne tendens ligner i højere grad SMA 6/+8 end SMA 11 belægningen.

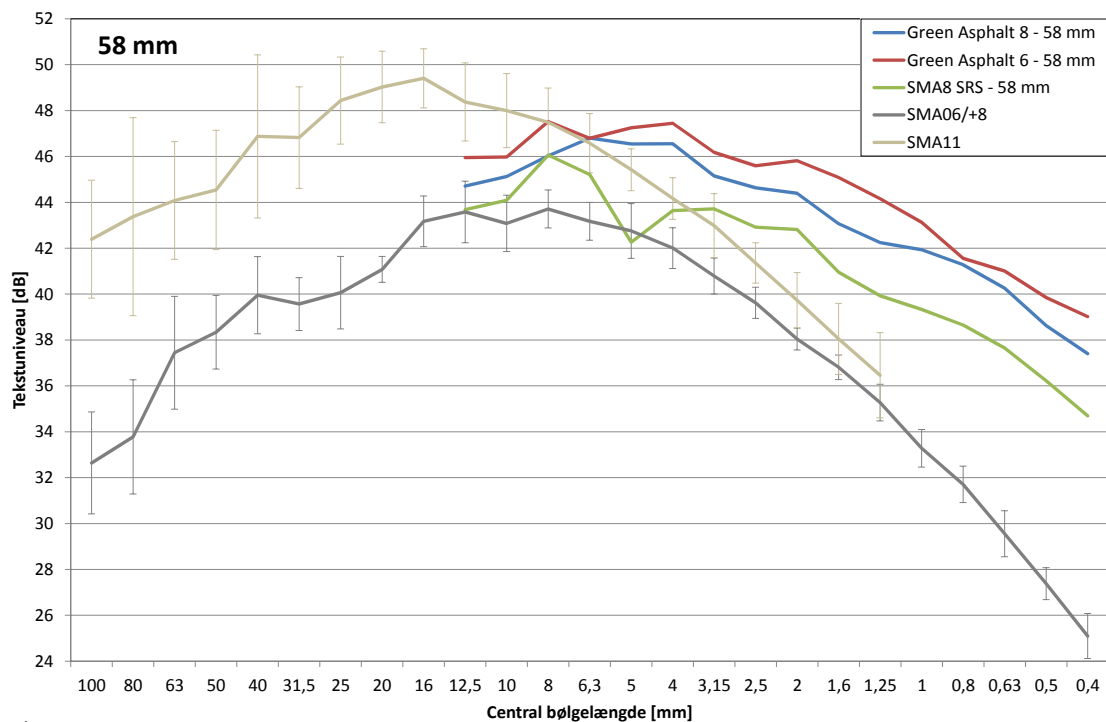


A) 29mm

8. Teksturmålinger på prøveplader



B) 38 mm



C) 58 mm

Figur 8.5:

Gennemsnitlige teksturspektre for testplader af A) 29 mm, B) 38 mm og C) 58 mm, for de tre forskellige belægningstyper. Spektre fra en SMA 6+8 og en SMA 11 belægning udlagt og målt på en rigtig vejstrækning er medtaget som reference.

Da prøvepladerne er forholdsvis små, er det ikke muligt at beregne f.eks. Estimated Road Noisiness Level (se evt. formel 3 i afsnit 5.1) ud fra belægningernes teksturniveauer, da der skal anvendes teksturniveauer ved bølglængderne 4 og 63 mm og det i de udførte målinger og analyser af prøvepladerne kun er muligt at nå bølglæng-

den 4 mm og op til 12,5 mm, men ikke helt op til 63 mm. Teksturniveauerne for de forskellige belægningstykkelser er dog i store træk ens for de målte spektre, hvorfor at der kan formodes, at der ikke vil være en forskel i teksturspektrene for de længere bølglængder, hvis der udlægges tykkere belægningslag i større prøver eller på vejen.

9. Virtuel slibning af belægningsoverflader

Som beskrevet i afsnit 3.1 vil en åben belægning med negativ/konkav overfladestruktur have gode akustiske egenskaber. Der har derfor i flere tilfælde været foretaget forsøg med at slibe belægningen for at skabe en mere negativ overfladetekstur end den havde efter udlægning. Forsøg med dette er foretaget på en tolags drænasfalt i Sverige [46]. Slibningen af belægningen resulterede i en reduktion af støjniveauet på 2-3 dB for personbiler umiddelbart efter slibningen målt med CPX-trailer metoden. Effekten ved at slibe belægningen var forsvundet efter et år – formodentlig fordi der i Sverige køres meget med pigdæk. Der er ligeledes forsøgt at slibe på en semi-drænasfalt med 15 % hulrum i Australien [47]. I dette tilfælde var effekten ligeledes i størrelsesordenen 2-3 dB målt støjreduktion, men modsat i Sverige er der ikke i [47] rapporteret om at støjreduktionen er forsvundet i dette forsøg. Der er ikke i hverken [46] eller [47] rapporteret om at der skulle være opstået problemer med for lille friktion pga. slibningen af disse to vejbelægnings overflader.

Da det er en bekostelig og kompliceret affære at slibe på en rigtig vejbelægning på en vej, er der i dette projekt som et første step foretaget en virtuel slibning af forskellige belægningsprofiler for at beskrive potentialet for sådan en slibning. Den virtuelle slibning er foretaget i programmet Matlab. Et næste step kunne være at foretage slibning på nogle belægningsprøver i laboratoriet og foretage teksturmålinger for at analysere, om det er muligt at opnå teksturer svarende til den, der er opnået i dette virtuelle eksperiment. Det vil samtidig være muligt at foretage pendulmålinger af de slebne belægnings friktion. Hvis resultaterne af et sådant laboratorieforsøg er positive, kunne et tredje step være at foretage et mindre slibningsforsøg på en virkelig vej under kontrollerede former samt efterfølgende at fortage støj og friktionsmålinger for at verificere resultaterne. Det kunne i den sammenhæng overvejes også at udføre målinger af belægningsernes rullemodstand.

9.1 Fremgangsmåde

Den virtuelle slibning i dette projekt er foregået efter følgende procedure:

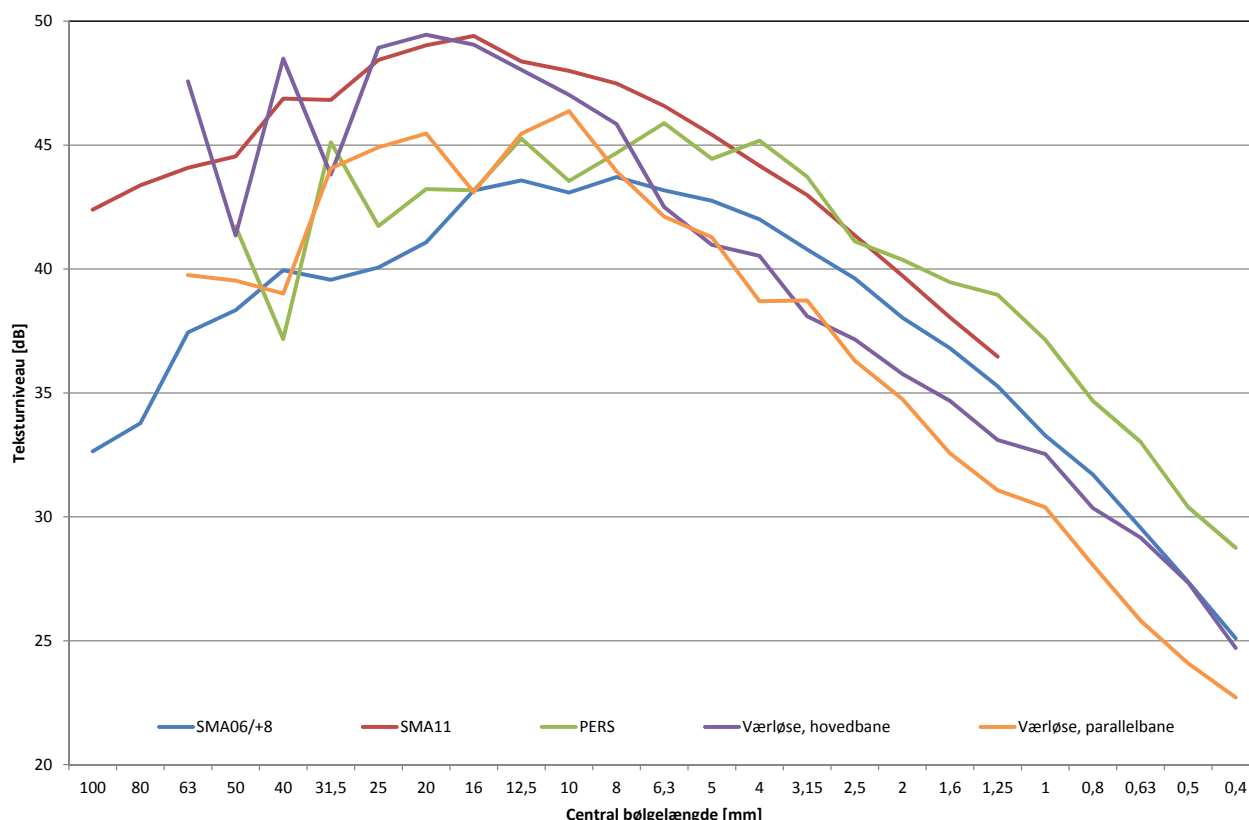
1. Der er udvalgt et belægningsprofil uden lange bølger, da hele profilet ønsket slebet. Slibningen foretages ved at "slibe" (skære toppen af) af hele profilet, hvorfor det har været nødvendigt at der ikke er nogen lange bølger i profilet
2. Der er foretaget slope- og offset-suppression af profilet
3. Der foretages en slibning ved at skære toppen af et profil, hvorefter der tilføjes hvid støj på det fladslebne stykke for at give det en vis fin tekstur således at det ikke er helt glat. Den hvide støj der tilføjes det slebne stykke er normalfordelt, og trækkes fra det fladslebne stykke. Den maksimale amplitude for støjen er 0,07 mm
4. For de slebne profiler beregnes teksturspektre og Estimated Road Noisiness Level (ERNL) (se evt. formel 3 i afsnit 5.1), som er et udtryk for den forventede støj fra en belægning med et givent tekstur-spektrum. ERNL skulle svare til det maksimale støjniveau L_{Amax} som måles ved SPB-vejside-støjmålinger på personbiler korregeret til en fart på 70 km/t.

Punkt 3 og 4 gentages, hvis der skal foretages yderligere slibning af profilet.

9.2 Slibning af belægningsprofiler

Det er i dette projekt valgt som et første forsøg at foretage virtuel slibning i et Matlab-program på tre forskellige belægningsprofiler, hvor der i forvejen forelå teksturdata som muliggjorde denne øvelse. Disse tre belægningsprofiler er ikke specielt udvalgt med henblik på, at de ville være særligt egnede til forsøg med slibning. Formålet har derimod været at afprøve den udviklede virtuelle slibningsmetode samt at få nogle første vurderinger af, om der er et potentiale for at opnå støjdemping på denne måde.

De tre belægningsprofiler er en poroelastisk belægning (PERS) som den der blev udlagt ved Kalvehave i sommeren 2014 (se evt. [3]), hovedbanen på Værløse flyveplads og parallelbanen på Værløse flyveplads. Figur 9.1 viser teksturprofilerne for de tre belægningsprofiler, inden der er blevet slebet på dem. Som referencer er spektrene for en støjreducerende SMA 6/+8 og en standard SMA 11 inkluderet. Figuren viser, at PERS-belægningen har teksturspektrum, som minder om SMA 6/+8 belægningen, idet det maksimale teksturniveau ligger ved 6,3 mm. Teksturspektret for hovedbanen ved Værløse minder mere om SMA 11 belægningen, da de har maksimalt teksturniveau ved hhv. 20 og 16 mm. Parallelbanen ved Værløse har maksimalt teksturniveau ved 10 mm, hvilket ligger mellem de to anvendte belægningsprofiler.



Figur 9.1:

Teksturspektre for de tre analyserede belægninger, inklusiv en støjreducerende SMA 6/+8 og en standard SMA 11.

Tabel 9.1 illustrerer Estimated Road Noise Level for belægningerne beregnet på baggrund af data for spektrene med anvendelse af formel 3 i afsnit 5.1. Tabellen viser, at belægningernes estimerede støjniveauer er rangeret med SMA 6/+8 som den mest støjsvage, herefter er rækkefølgen PERS, Værløse parallelbane, SMA 11 og Værløse hovedbane som den mest støjende.

Belægning	Estimated Road Noise Level ERNL [dB]
SMA 6/+11	68,2
SMA 11	71,0
PERS	69,6
Værløse, hovedbane	73,7
Værløse, parallelbane	70,2

Tabel 9.1:

Estimated Road Noise Level (ERNL) beregnet for belægningerne før der foretages virtuelt slibning. Ved ERNL-beregningen er teksturniveauet for 50 mm anvendt for PERS-belægningen grundet et kortere profil.

Porøelastisk belægning

PERS-belægningen ville i praksis ikke egne sig til at blive slebet på, da den indeholder gummigranulat, som ville umuliggøre øvelsen. Det er dog intet problem at foretage

en virtuel slibning af belægningen, da den repræsenterer et profil fra en porøs belægning. I dette tilfælde repræsenterer PERS-belægningen en drænasfalt med 6 mm maksimal stenstørrelse (DA 6). Figur 9.2 illustrerer profilet, der bliver slebet på. Profilet er ca. 0,75 m langt, og har en højde fra -3 til 2 mm. Slibningen foregår ved at der først slibes ned til 1,0 mm, hvorefter at der slibes 0,1 mm af, indtil profilet når til 0,0 mm. Af figuren ses tydeligt, hvordan at profilet bliver mere og mere "fladt" og får altså får en negativ konkav struktur.

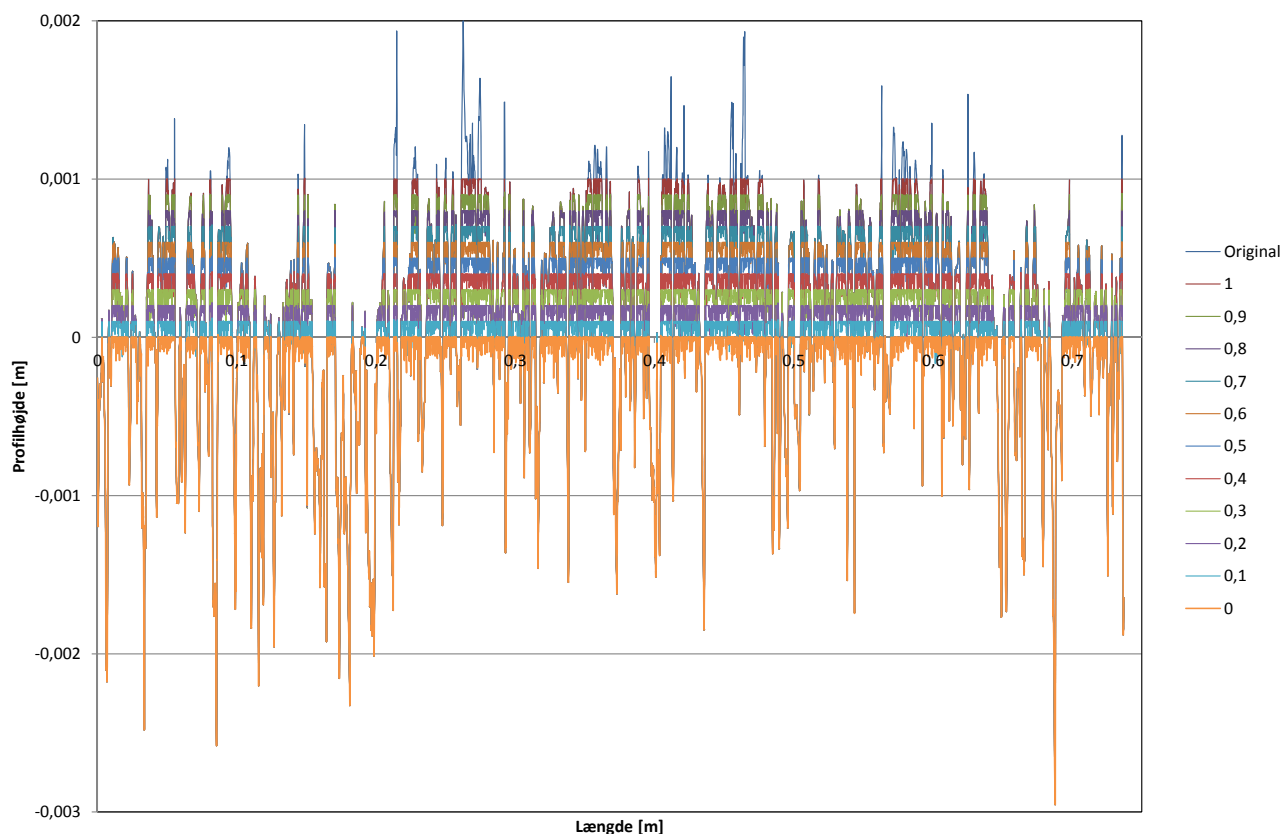
Figur 9.3 illustrerer teksturspektrene for det originale og de slebne profiler. Der ses tydeligt, hvordan at slibningen har mindst indflydelse på de korteste bølgelængder omkring 0,8- 0,4 mm, hvor effekten er relativt beskednen. Det resterende spektrum påvirkes stort set med samme niveau over hele spektret.

Da det umiddelbart er vanskeligt at se noget entydigt omkring udviklingen i teksturspektrene og betydningen for støjen, er Estimated Road Noise Level (ERNL) beregnet igen med brug af formel 3. Figur 9.4 illustrerer ERNL for de forskellige teksturprofiler. Af figuren ses der er fald i ERNL, hver gang der slibes yderligere af profilet. Det estimerede støjniveau falder ca. 3 dB fra det originale profil til profilhøjden 0,000 m.

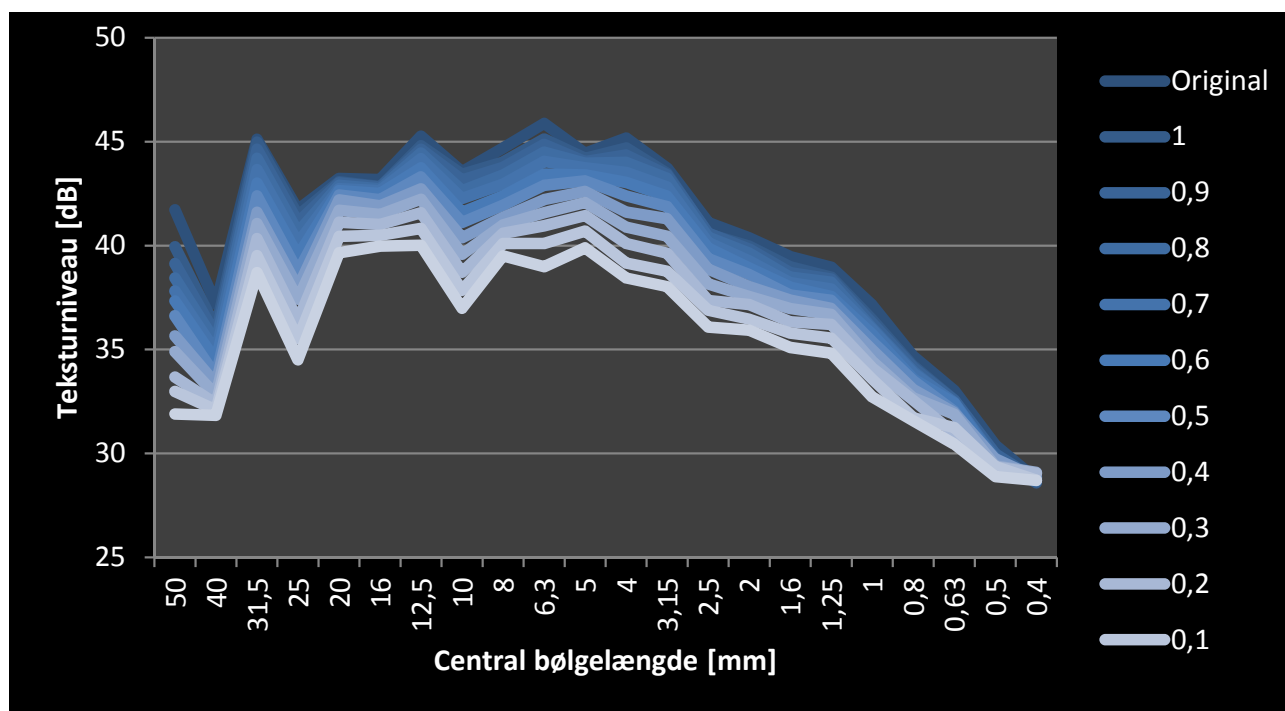
Værløse flyveplads, hovedbanen

Belægningstypen på hovedbanen på Værløse flyveplads

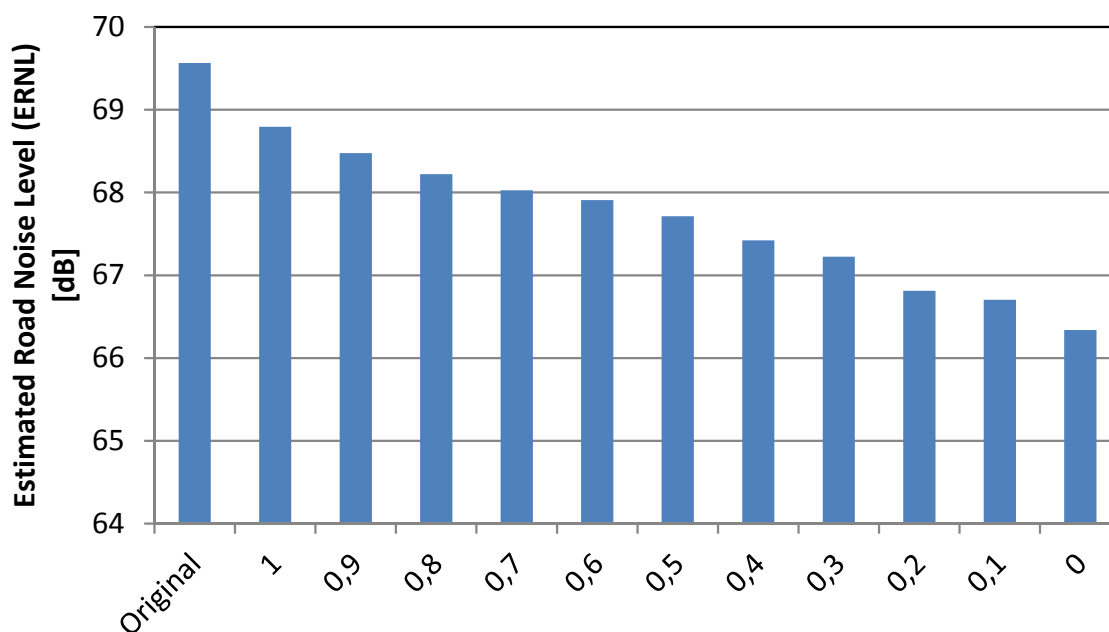
9. Virtuel slibning af belægningsoverflader



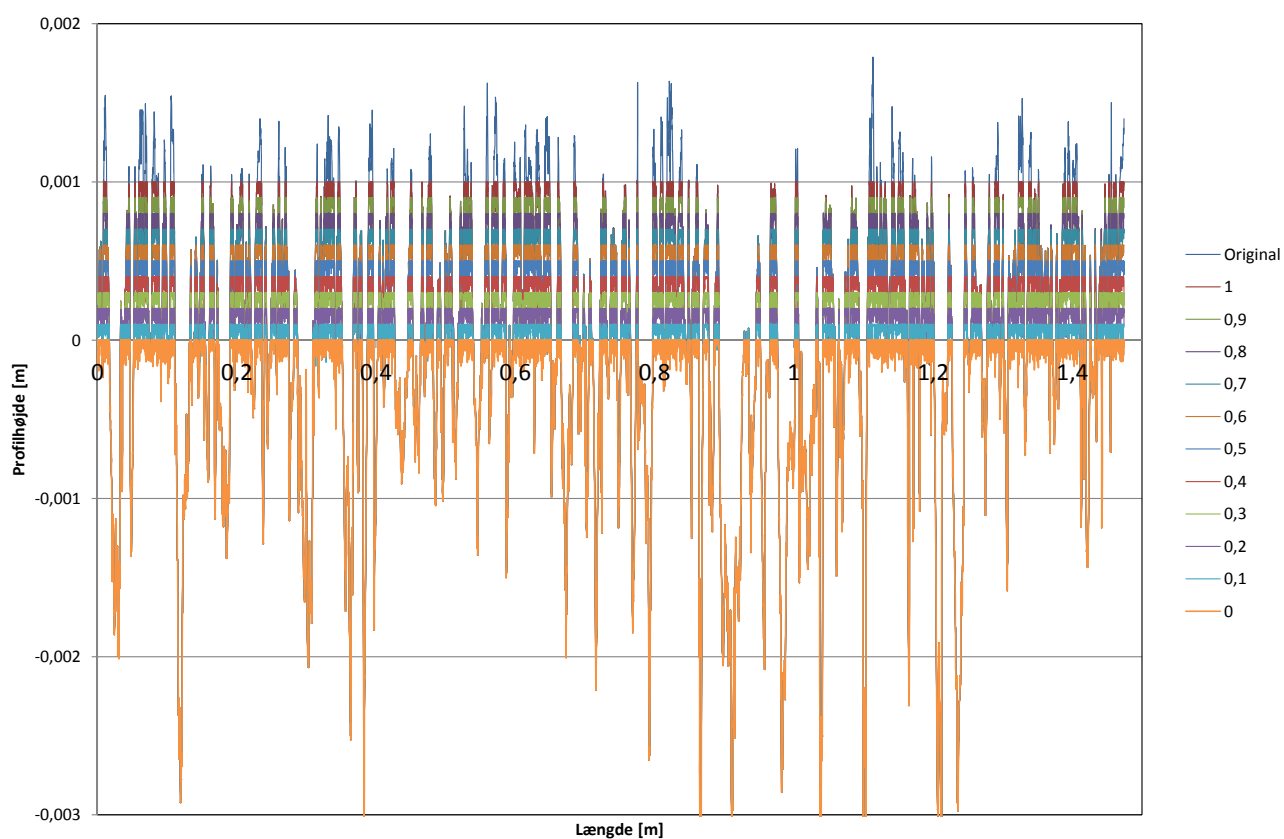
Figur 9.2:
Originalt og slebne PERS (DA 6) teksturprofiler. Slibningen foretages fra profilhøjden 0,001 til 0,000 m.



Figur 9.3:
Teksturspektr for det originale og de slebne PERS (DA 6) teksturprofiler.



Figur 9.4:
Estimated Road Noise Level beregnet for det originale og de slebne PERS (DA 6) teksturprofiler.

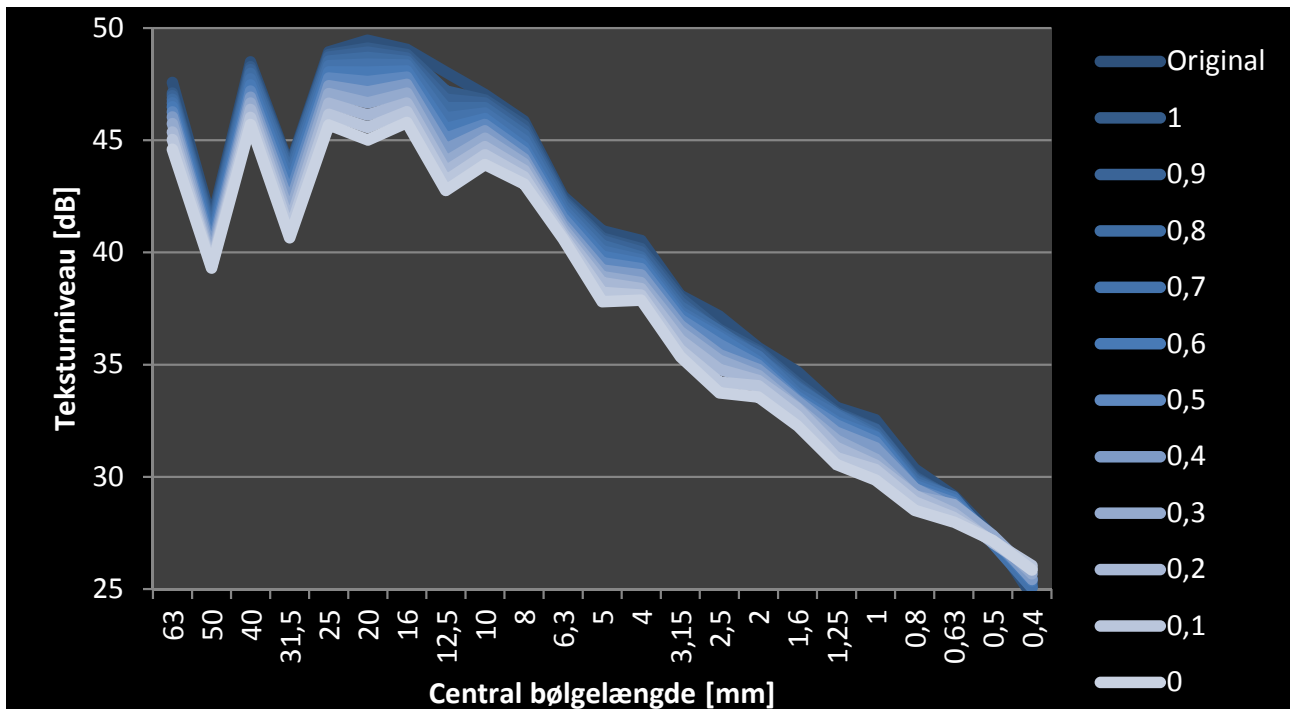


Figur 9.5:
Originalt og slebne teksturprofiler fra hovedbanen på Værløse flyveplads. Slibningen foretages fra profilhøjden 0,001 til 0,000 m

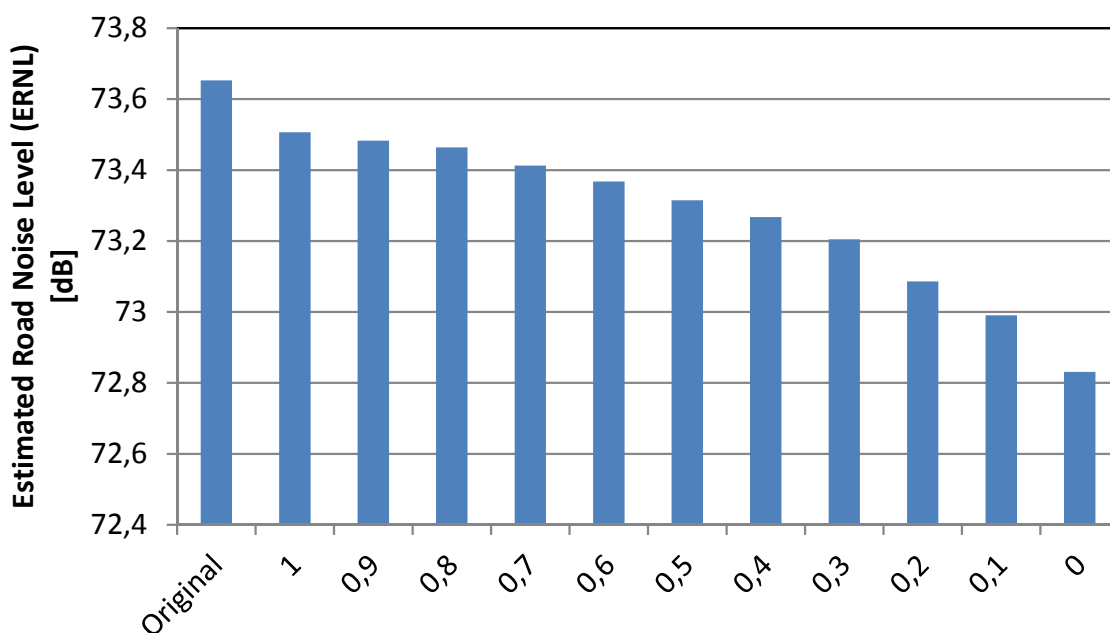
er ukendt. Ud fra teksturspektrene og ERNL er det en belægning, der er grovere og mere støjende end en standard SMA 11. På figur 9.5 ses profilet, der slibes på. Profilet er ca. 1,5 m langt, og har en højde fra ca. -3,5 til 1,5 mm. Slibningen foregår igen ved at der først slibes ned til 1,0 mm, hvorefter at der slibes 0,1 mm af indtil at

profilet når til 0,0 mm. Af figuren ses tydeligt, hvordan at profilet bliver mere og mere "fladt", altså får en negativ konkav struktur.

Figur 9.6 illustrerer teksturspektrene for det originale og de slebne profiler. Der ses tydeligt, hvordan effekten af



Figur 9.6:
Teksturspektre for det originale og de slebne teksturprofiler fra hovedbanen på Værløse flyveplads.



Figur 9.7:
Estimated Road Noise Level (ERNL) for det originale og de slebne teksturprofiler fra hovedbanen på Værløse flyveplads.

slibningen er betydeligt mindre end for PERS-belægningen. Der ses endda en stigning i teksturniveau ved bølgelængden 0,4 mm, og et nærmest uændret niveau ved 0,5 mm. En beregning af den estimerede støj (ERNL) bekræfter, at effekten af slibningen har været mere begrænset – se figur 9.7. Reduktionen af støjen ved slibningen er mindre end 1 dB, fra det originale profil til profilhøjden 0,0 mm.

Værløse flyveplads, parallelbane

Belægningstypen på parallelbanen på Værløse flyveplads er ligeledes ukendt. Ud fra teksturspektrene og ERNL-beregningerne er det en belægning, hvis støjmassige egenskaber ligger mellem en SMA 6/+8 og en SMA 11. Det kunne fx ligne en SMA 8 belægning. På figur 9.8 ses profilet, der slibes på. Profilet er ca. 1,5 m langt, og har en højde fra ca. -2 til 1,5 mm. Slibningen foregår ved at der først slibes ned til 1,0 mm, hvorefter der slibes 0,1 mm af, indtil profilet når til 0,0 mm. Af figuren ses tydeligt, hvordan profilet bliver mere og mere "fladt", altså får en negativ konkav struktur.

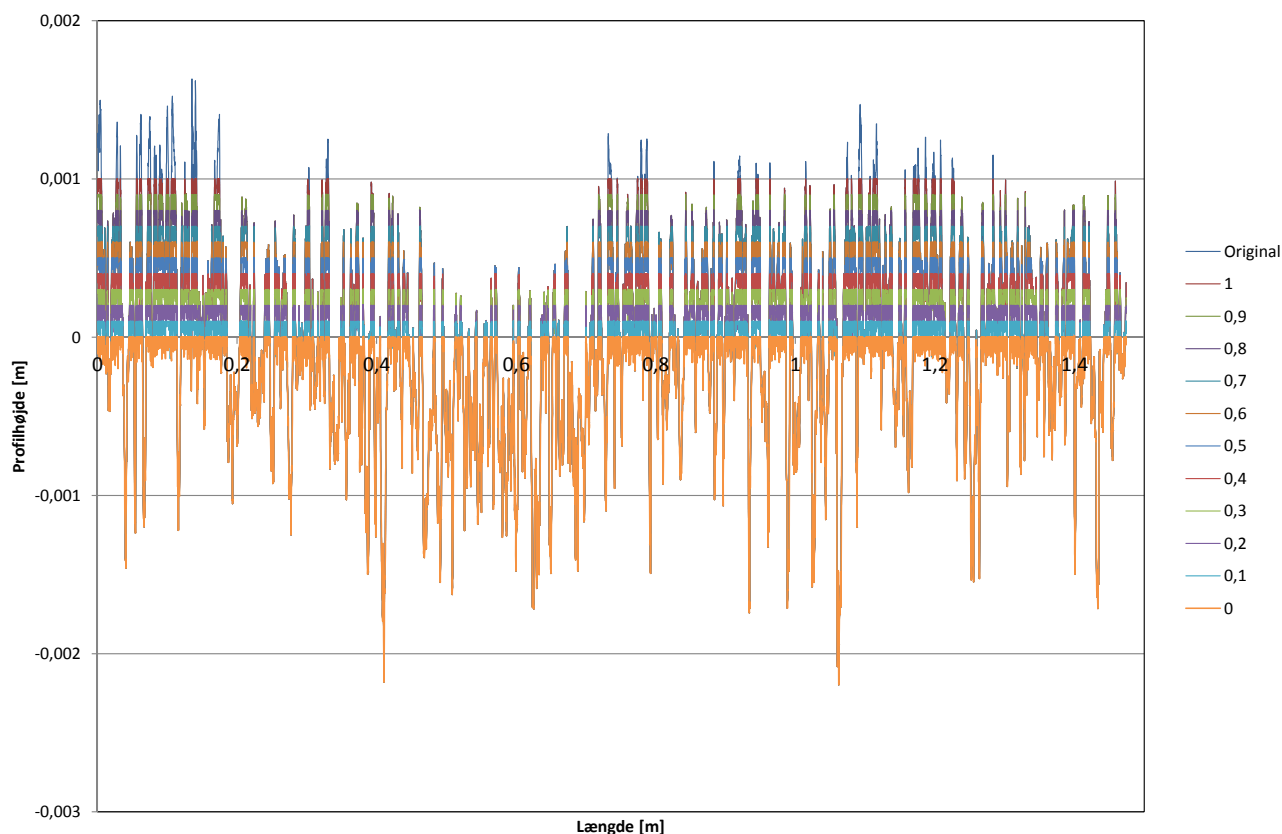
Figur 9.9 illustrerer teksturspektrene for det originale og de slebne profiler. Som for hovedbanen ses en stigning i teksturniveau ved bølgelængden 0,4 mm, og et nærmest uændret niveau ved 0,5 mm. Der ses desuden, at niveauerne ved 10 og 25 mm påvirkes betydeligt mere end de andre bølgelængder. Effekten af slibningen er

umiddelbart større end for hovedbanen, men mindre end PERS-belægningen. En beregning af støj udtrykt som ERNL bekræfter, at effekten af slibningen har været mere effektiv end for hovedbanen, men mindre end PERS-belægningen – se figur 9.10. Den beregnede støjreduktionen ved slibningen er ca. 1,3 dB, fra det originale profil til profilhøjden 0,0 mm.

9.3 Resultater af slibningen

Resultaterne af slibningen viser tydeligvis et potentiale ved at foretage en slibning af belægningernes overflade, for at skabe en mere negativ overfladetekstur. Det største potentiale vises for PERS-belægningen, der repræsenterer en porøs belægning (DA 6), ligesom dem der er blevet slebet på under forsøgene i Sverige og Australien. Dette kan indikere, at det største potentiale i forhold til at opnå en støjreduktion findes for porøse belægningstyper samt eventuelt andre typer med en åben overfladestruktur. For både forsøgene i Sverige, Australien og den virtuelle slibning er potentialet for slibningen op til 2-3 dB støjreduktion.

Hvis den virtuelle slibning repræsenterer, hvordan en fysisk vejbelægning vil se ud efter slibning, kan den virtuelle metode anvendes som et værktøj til at vurdere, hvor meget at der skal slibes af en belægning. Dette vil kunne foretages ved at måle et eller flere teksturprofiler af den belægning, der skal slibes. Det vil dog være nød-

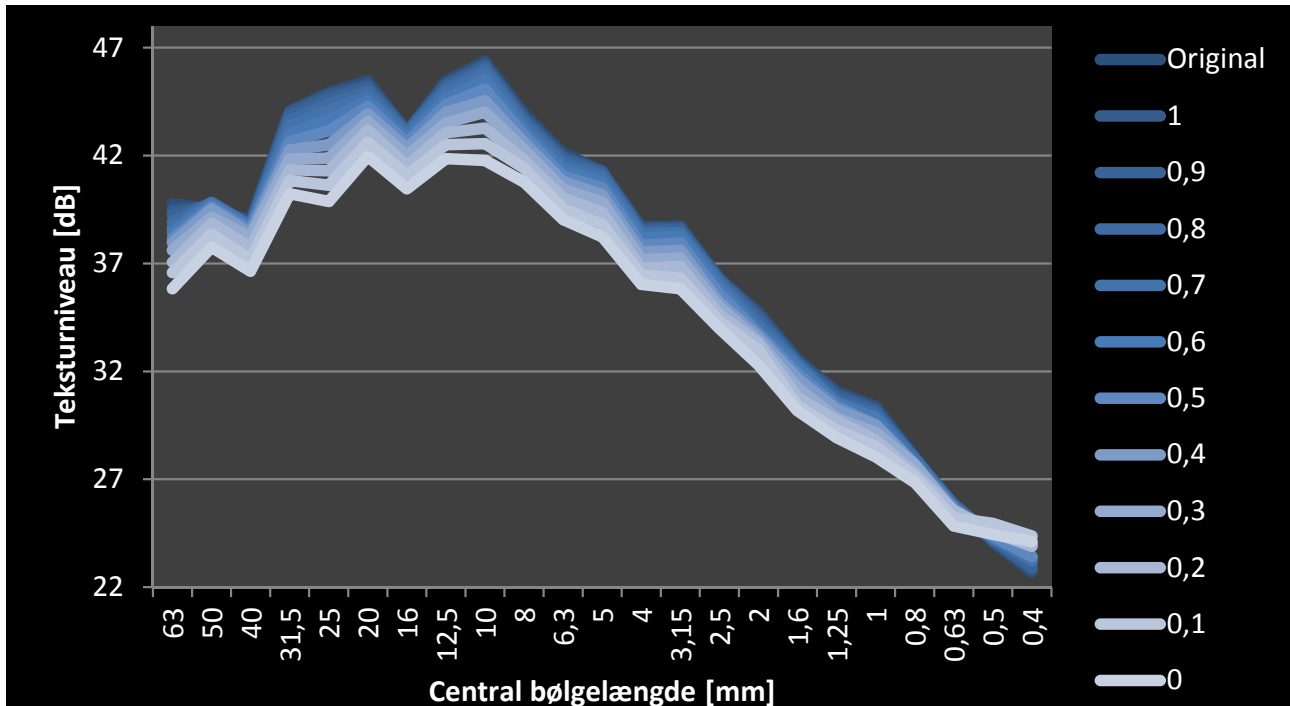


Figur 9.8: Originalt og slebne teksturprofiler fra parallelbanen på Værløse flyveplads. Slibningen foretages fra profilhøjden 0,001 til 0,000 m.

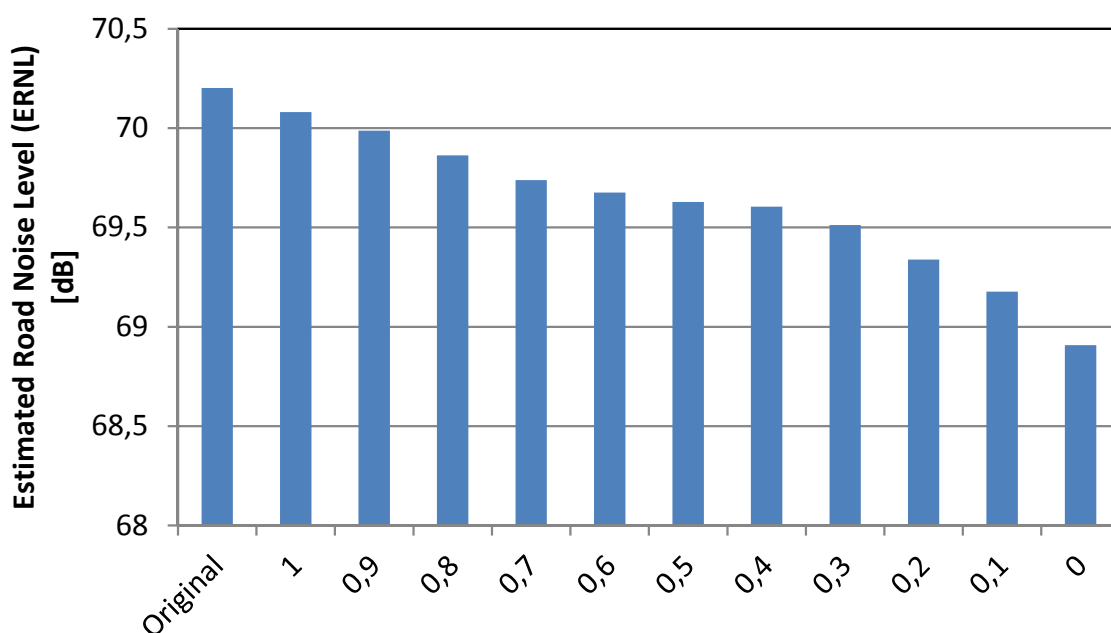
vendigt at undersøge, om den virtuelle slibning afspejler en virkelig slibning gennem nogle forsøg med slibning af belægninger i laboratoriet.

Hvis der foretages en fysisk slibning på en belægning, kan man desuden løbende måle teksturprofiler for at

vurdere, hvorvidt der fremkommer en effekt af at slibe yderligere af belægningen. Der skal dog bemærkes, at slibningen potentielt vil kunne nedsætte friktionen på belægningen, hvorfor det som tidligere nævnt også er vigtigt at måle et evt. friktionstab i forbindelse med slibningen.



Figur 9.9:
Teksturspektre for det originale og de slebne teksturprofiler fra parallelbanen på Værløse flyveplads.



Figur 9.10:
Estimated Road Noise Level (ERNL) for det originale og de slebne teksturprofiler fra parallelbanen på Værløse flyveplads.

10. Optimalt valg af bindemiddel i forhold til hærkning

10.1 Baggrund og formål

Holdbarheden af tynde støjreducerende slidlag er meget påvirket af visse karakteristiske træk ved disse belægnings typer. Deres støjreducerende egenskaber er som regel forbundet med deres overfladetekstur, hvilket fremmer grov-teksturede og åbne belægningsoverflader med anvendelse af en lille maksimal stenstørrelse (se afsnit 3.1). Det medfører, at en forholdsvis stor overflade eksponeres for vejr og vind, samt sollys og luftens ilt. Det påvirker det valgte bindemiddel; typisk i form af hærkning af bindemidlet (kaldet langtidshærkning). Selv under produktion og udlægning er disse åbengraderede belægningstyper udsat for hærkning (kaldet korttidshærkning), så også denne del af processen er vigtig at forholde sig til, når det optimale bindemiddel skal vælges og dermed sikre en god holdbarhed. Selvom bygherren som udgangspunkt oplyser en forventet bindemiddeltype ved udbudet, er personen, der foretager vurderingen af bindemidlet ofte entreprenøren, da ansvaret for det endelige valg af bindemiddel gerne pålægges ham i SAB'en (Særlige Arbejdsbetingelser). Det gælder nok i særlig grad, hvor forholdene (trafikbelastning, klima mv.) antyder, at polymermodificeret bitumen/polymermodificeret asfalt kunne være et muligt bud på en holdbar løsning. Her indgår netop bindemidlets forbedrede egenskaber som en naturlig del af asfaltens mix design.

Valget af bindemiddel sker som oftest på baggrund af trafikmængden på den pågældende strækning, og for disse slidlagstyper er sporkøringsresistens en anden vigtig vurderingsparameter i valg af bindemiddel. Det betyder generelt en trend mod stivere, hårdere bindemidler, enten i form af en hårdere almindelig vejbitumen (for alle lag, ikke kun bære- og bindelag) eller i form af modificering af bindemiddel med polymertilsætning (primært for slidlag). Sidstnævnte sker i Danmark som regel ikke ved anvendelse af en forud fremstillet, polymermodificeret bitumen, men ved "in-situ" tilsætning under blanding af asfalten, hvor polymer-pulver tilsættes direkte ind i mikseren, hvor en almindelig vejbitumen er benyttet som bindemiddel.

Der vil selvfølgelig ske en vis nedbrydning af polymeren under produktion og udlægning, men i den efterfølgende langtidshærkning af det samlede bindemiddel anses polymeren ofte for at være relativt inert sammenlignet med basis-bitumens hærkning over tid. Ved ekstraktionsanalyser, hvor bindemidlet fra borekerner separeres fra sten- og fillermateriale, kan disse fænomener dog ikke skilles,

ligesom at man også kan komme til at påvirke polymerens "struktur" og fordeling under ekstraktion, hvilket kan medføre lidt usikkerhed på, om detailanalyser af det ekstraheerede bindemiddels egenskaber er helt identisk med dets tilstand i den færdige vejbelægning. Derfor benytter man sig gerne i en vis udstrækning af vikarierende modelforsøg til at beskrive disse forhold på samme måde, som man benytter modelforsøg til at sandsynliggøre effekten af forbedrede egenskaber ved en "in-situ" tilsat polymer.

Formålet med de gennemførte laboratorieforsøg af bindemidlers hærkningsforhold er at belyse nogle af de vurderinger, som entreprenøren må foretage ved optimalt valg af bindemiddeelhårdhed til et tyndt støjreducerende slidlagsbelægning. Det vil sige vurderingen af, om det er mere optimalt at producere asfalten med en blødere udgangsbitumen end med en hårdere type set i forhold til de efterfølgende års naturlige hærkning af udgangsbitumenen på vejen. Hele undersøgelsen og dataanalysen er rapporteret i [34], men der vil i dette kapitel blive givet et uddrag af de væsentligste resultater og problemstillinger.

Som alternativ til direkte analyse anvender man nogle gange etablerede "tommelfinger"-regler som vikarierende beslutningsgrundlag. Det er også et formål med undersøgelsen at demonstrere, at gamle "tommelfinger"-regler måske skal benyttes med forsigtighed. Enten kan udviklingen have medført, at forudsætningerne for dem er ændret væsentligt, eller hvis de stadig er "gyldige", at man nu efterhånden anvender dem udenfor deres "tidligere" gyldighedsområde uden at erkende, at dokumentationsgrundlaget er beskedent/manglende.

10.2 Forsøgsplan til vurdering af udgangsbitumen og hærkningsforhold

Karakteristika og konditionerings

I samarbejde med NCC Roads A/S er der foretaget en undersøgelse af karakteristika for tre forskellige bindemidler, som varierer i hårdhed, men som alle skulle stamme fra den samme oprindelse (oliekilder fra samme geografiske område eller feedstock fra samme processtrømme i raffinaderiet). De undersøgte karakteristika omfatter både traditionelle bitumen-data, samt rheologiske og kemiske målinger og deraf afledte beregnede størrelser.

De traditionelle analyser, der beskriver egenskaber ved middel, høj og lav anvendelsestemperatur, omfatter:

- DS/EN 1426 Penetration
- DS/EN 1427 Blødhedspunkt kugle og ring
- DS/EN 12593 Brudpunkt Fraass samt
- Beregning af penetrationsindex, I_p , efter DS/EN 12591, som kan opfattes som et mål for temperaturfølsomheden.

Hertil kommer nogle beregnede størrelser, som sædvanligvis specificeres i produktstandarden DS/EN 12591 til vurdering af bindemidlet før og efter en konditionering:

- Tilbageværende penetration (penetration efter konditionering i forhold til udgangsværdien)
- Stigning i blødhedspunkt kugle og ring (differencen mellem bestemmelsen efter og før konditionering)

De rheologiske målinger til karakterisering af bindemidlets materialeegenskaber under forskellige belastnings- og temperaturforhold omfatter:

- Bestemmelse af forskydningsmodul og fasevinkel med Dynamic Shear Rheometer (DSR) analogt til DS/EN 14771 med to målegeometrier:
 - 11 frekvenser ved otte temperaturer (100 °C – 30 °C; 0,01 Hz – 10 Hz) med 25 mm Ø og 1 mm gab
 - 11 frekvenser ved syv temperaturer (55 °C – -5 °C; 0,1 Hz – 10 Hz) med 8 mm Ø og 2 mm gab
 - Masterkurver beregnet for kompleks forskydningsmodul, G^* , og fasevinkel for det samlede måleområde for en referencetemperatur på 40 °C. Herved opnås et stort interval for den reducerede frekvens fra 10⁻⁴ Hz til 10⁶ Hz, altså 10 dekader

Kemisk identifikation af funktionelle grupper i bindemidlet omfatter:

- Infrarød spektroskopi med ATR-celle (refleksions-IR) i området 4000 cm⁻¹ – 626 cm⁻¹. Infrarød spektroskopi viser et "bjerghøj" af absorptionsstoppe, der kan tolkes i forhold til vibrationsenergi relateret til specifikke, kemiske bindinger i det undersøgte materiale. (se figur 10.3)
- Beregning af diverse indices relateret til kemiske stofgrupper i bitumen efter Nathalie Pieri [35]. De omtalte indices beregnes som forhold mellem forskellige top-arealer i spektrene, som ventes at repræsentere forskellige stofgruppers specifikke, svingningsmæssige "signatur". Det drejer sig primært om top-arealer, der ligger i området 1735-705 cm⁻¹. De nævnte indices skal i følge [35] kunne give et indtryk af en

bitumens grad af mættede og aromatiske kulbrinte-forbindelser, som er specielt anvendeligt ved relative sammenligninger

Den anvendte modelhærkning omfatter tre niveauer, der indebærer konditionerings svarende til korttidshærkning (dvs. den hærkning der finder sted under produktion, silolagring, transport og udlægning) samt moderat langtidshærkning. Konditionerings udføres ved 163 °C ved anvendelse af følgende proces:

- DS/EN 12607-1 Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT (svarende til korttidshærkning over 75 minutter)
- DS/EN 12607-1 "1½ x RTFOT" (moderat forlænget hærkning; 1½ x RTFOT; ca. 112,5 minutter)
- DS/EN 12607-1 "2 x RTFOT" (forlænget hærkning; 2 x RTFOT; ca. 150 minutter)

Årsagen til, at der kun har været anvendt moderat forlængede hærkninger skyldes, at det også har været interessant at undersøge, hvorvidt moderat hærkede bløde bindemidler svarer til de tilsvarende hårdere bindemidler, som kunne indkøbes. Derfor har der ikke været udført deciderede langtidshærkninger efter DS/EN 14469 Pressure Ageing Vessel (PAV), som sædvanligvis bruges til simulering af langtidshærkning under danske klimatiske forhold (100 °C, 20 MPa, 20 timer). Da langtidshærkning på vejen også er afhængig af type af asfalt og indbygningsforhold (hulrum, porestruktur og mørtelhinde-tykkelse), kan det ikke siges generelt at svare til en givet fast eksponeringstid på vejen. Det formodes dog, at PAV svarer til en størrelsesorden af ca. 7 til 10 år, men det er desuden også klimaafhængigt.

Til sammenligning kan det nævnes – baseret på østrigsk erfaring – at 3 x RTFOT hærkning stort set svarer til den hærkning, der opnås ved PAV-hærkning på RTFOT-hærdet materiale. Det betyder, at konditioneringsmetoden "2 x RTFOT" svarer til halvdelen af den hærkningstid, der ifølge østrigerne skulle modsvare i den standardiserede langtidshærkning (PAV). Der er ikke specifikt kendskab til detaljeret sammenhæng mellem hærkningstids og hærkningsniveau, da dette også afhænger af den egenskab/parameter, der ligger til grund for vurderingen (dvs. penetration, blødhedspunkt kugle og ring, rheologi, etc.). Der er dog flere indikationer på, at hærkningens tidsafhængighed er en aftagende funktion, hvorfor "2 x RTFOT" må antages at svare til mindst halvdelen af PAV's hærkningsniveau.

De traditionelle prøvninger og konditionerings er for alle prøverne på nær to udført hos NCC Roads A/S, mens de to sidste samt de avancerede rheologiske og kemiske målinger er udført på Vejdirektoratets laboratorium.

Prøvemateriale

De tre undersøgte bitumener svarer til tre forskellige

hårdheder af bitumen stammende fra samme oprindelse (dvs. feedstock/råolie sammensætning). Det er opnået ved samtidig bestilling af den hårdeste og blødeste af bitumenene i undersøgelsen, og hvor den sidste mellemtype er fremstillet ved blanding af de to andre. I Danmark stiller asfaltproducenterne sædvanligvis krav til bitumenleverandørerne om, at mellemtyper skal kunne fremstilles ved blanding af hårdere og blødere typer, som overholder den europæiske produktstandard DS/EN 12591.

Betegnelserne for de tre anvendte bitumener fra hårdeste til blødeste er:

- 40/60
- 100/150 (fremstillet ved blanding af 35 % 40/60 og 65 % 160/220)
- 160/220

40/60 bitumenen er medtaget som reference til sammenligning af hærkede udgaver af de andre bindemidler, hvorfor der ikke er udført hærkninger på dette bindemiddel.

10.3 Databehandling

Vurdering af datakvalitet (bias)

En undersøgelse som denne, hvor man kombinerer resultater udført på flere laboratorier, løber altid risikoen for, at forskelle laboratorierne imellem (på grund af statistisk spredning knyttet til reproducérbarhed) kan bidrage med en ekstra bias ("slør") i de samlede data. Det er nok baggrunden for, at bitumen 100/150 hærket 0, 1, 1½ og 2 gange RTFOT ikke helt giver den forventede, monotone udvikling i alle bindemiddeldata. Af de tre hærkede 100/150 er det ikke muligt at udskille ét hærkningsniveau (dvs. en prøve), som årsagen til den manglende monotoni, da der er flere uventede forhold; se eksempelvis resultater for penetration og blødhedspunkt kugle og ring ved sammenligning mellem 100/150 1 x RTFOT (SV_12792R) og 100/150 1½ x RTFOT (SV_12793) i tabel 10.1. Standardhærkningen efter RTFOT (SV_12792R) har hærket prøven forholdsvis tæt på 2 x RTFOT (SV_12794). På den anden side har hærkningen (1½ x RTFOT, SV_12793) påvirket bindemidlet mindre end forventet ved standard RTFOT vurderet ud fra penetrationen på det hærkede bindemiddel.

Procedurerne i laboratorierne er blevet kontrolleret, uden at nogen afvigelse er konstateret. Det ville have været ønskeligt at kunne gentage disse to prøver, men på grund af mangel på ekstra prøve materiale har det ikke været muligt uden, at store dele af undersøgelsen skulle gentages. Da dette forhold primært har påvirket penetration og blødhedspunkt og for eksempel ikke de rheologiske data, er det besluttet at acceptere dette "slør" i de fundne data, som kan måske mindske styrken i de statistiske vurderinger, der primært involverer penetrationsmålinger.

Statistisk databehandling

Datasættet bestående af 39 variable for de ni bindemidler (tre udgangsbitumener og diverse hærkede versioner) behandles statistisk for at undersøge/vurdere mulige sammenhænge – primært relateret til bitumentype (160/220, 100/150 og 40/60) og hærkningstilstand.

Indledningsvis foretages en kemometrisk behandling (Principal Component Analysis) for at afdække mulige "strukturer" i data-sættet. Princippet i den kemometriske behandling af datasættets 351 punkter (39 variable; ni prøver) kan visuelt sammenlignes med, at der i en flerdimensional "data-sky" ønskes fundet det færrest mulige linear-kombinationer (Principal Components) af variable, som kan danne "vinkelrette akser" til beskrivelse af variationen i data-sættet. Vurdering af de fundne Principal Components kan afsløre "strukturer" i datasættet og give inspiration til test for sammenhænge, som efterfølgende kan detailanalyseres med lineær eller multipel lineær regression. I dette kapitel vil der ikke blive gået nærmere ind på den matematisk-statistiske databehandling, idet der henvises til [34], men der her vil blive fokuseret på en mere kvalitativ vurdering.

10.4 Diskussion og tolkning af resultaterne

Traditionelle bitumendata

Tabel 10.1 indeholder resultaterne af de traditionelle bitumenprøvninger og deres beregnede størrelser. De forskellige tider for hærkningslængder er her oplyst som antal gange standardlængden på de 75 minutter er udført. Når tiden i minutter ikke er benyttet som parameter skyldes det, at det måske vil antyde en større præcision, end datamaterialet kan bære. Samtidigt vil hærkningsparameteren, antal gange, også signalere den forenkede antagelse, at hærkningen er lineær, hvilket er en sandhed med modifikationer afhængigt af, hvordan det vurderes.

De traditionelle bitumendata stammer primært fra tre prøvningsmetoder, som kan opfattes at repræsentere tre forskellige temperatur-områder. Penetrationsbestemmelse udføres ved 25 °C og dækker en mellemtemperatur i brugsområdet; dvs. den temperatur som bindemidlet har under de klimatiske forhold ude på vejen. Blødhedspunkt kugle og ring dækker med lidt god vilje den høje ende af brugstemperaturen (vejtemperaturen med sol en varm sommerdag), mens brudpunkt Fraass repræsenterer lavtemperatur-området (vinterforhold med dyb frost). Hertil kommer de beregnede størrelser som følge af de udførte hærkninger af bindemidlet. Tilbageværende penetration (engelsk Retained Penetration; variabelnavn RetPEN) er forholdet mellem penetrationen for det hærkede bindemiddel over værdien for uhærkede bindemiddel, mens stigning i blødhedspunkt kugle og ring (variabelnavn: DeltaTRB) er differencen efter og før hærkning for blødhedspunktet. Ip er penetrationsindekset, som beregnes ud fra penetration og blødhedspunkt kugle og ring, og det beskriver bindemidlets temperaturfølsomhed.

Prøvens ID nummer	Bitumen type	% 40/60 (Blandingsforhold mellem 40/60 og 160/220)	Hærdningslængde efter RTFOT (DS/EN 12607-1) - i forhold til normal procedure	Penetration ved 25 °C (DS/EN 1426)	Blødhedspunkt kugle og ring (DS/EN 1427)	Penetrationsindex, Ip - beregnet efter DS/EN 12591	Brudpunkt Fraass (DS/EN 12593)	Tilbageværende penetration (DS/EN 12591)	Stigning i blødhedspunkt kugle og ring (DS/EN 12591)
ID_nr	Grade	Amount	RTFOT	PEN	TRB	IP	TF	RetPEN	DeltaTBR
		[%]	[antal]	[0,1 mm]	[°C]	-	[°C]	-	[°C]
SV_12791	40/60 udgangsbitumen	100	0,0	48	51,6	-0,91	-7,5	100	0,0
SV_12792	100/150 udgangsbitumen	35	0,0	102	44,8	-0,80	-18	100	0,0
SV_12792R	100/150 – hærdet 1 x RTFOT	35	1,0	60	49,4	-0,93	-22	59	4,6
SV_12793	100/150 – hærdet 1½ x RTFOT	35	1,5	78	47,4	-0,80	-13	76	2,6
SV_12794	100/150 – hærdet 2 x RTFOT	35	2,0	66	50,8	-0,33	-13	65	6,0
SV_12795	160/220 udgangsbitumen	0	0,0	169	40,8	-0,45	-22	100	0,0
SV_12795R	160/220 – hærdet 1 x RTFOT	0	1,0	88	45,6	-0,99	-24	52	4,8
SV_12796	160/220 – hærdet 1½ x RTFOT	0	1,5	46	53,2	-0,63	-11	27	12,4
SV_12797	160/220 – hærdet 2 x RTFOT	0	2,0	41	55,0	-0,48	-12	24	14,2

Tabel 10.1:

Traditionelle bitumen-data for de undersøgte bindemidler; inkl. anvendte variabelnavne ved den statistiske analyse.

Antallet af prøver i denne undersøgelse er beskedent, hvorfor det ikke synes formålstjenligt at teste for polynomium-sammenhænge udover lineære sammenhænge. Det faktum kan – i tillæg til forholdsvis dårlig præcision for brudpunkt Fraass – i nogen grad påvirke den potentielle forklaringsgrad for prøvningen. Det er ikke nogen lovmæssighed, men der ses ofte ved bestemmelse af brudpunkt Fraass på uhærdede og hærdede bitumenprøver en beskedent forbedring af værdien ved korttidshærdningen (RTFOT) i forhold til den originale bitumen, mens yderligere hærkning derefter leder til dårligere kuldeegenskaber vurderet ved samme metode. I tabel 10.1 ses da også for både 100/150 og 160/220, at brudpunkt Fraass for RTFOT-versionerne har henholdsvis 4 og 2 °C lavere værdier end udgangsbitumenene, hvorefter yderligere hærkning får værdierne til at stige.

Der er fundet tre lineære sammenhænge for de traditionelle bitumendata med en høj forklaringsgrad (R^2). De to er beslægtede, da sammenhængen mellem penetration og blødhedspunkt kugle og ring bliver endnu bedre, når det er logaritmen til penetrationen, der benyttes som variabel. Her når forklaringsgraden op på 96 %. Samme niveau (97 %) opnås ved hærkningsvurderingen i sammenhængen mellem stigning i blødhedspunkt kugle og ring og tilbageværende penetration.

Rheologiske målinger

De rheologiske målinger på bituminøst bindemiddel med bestemmelse af komplekst forskydningsmodul og fasevinkel, som vises i figur 10.1 og figur 10.2 er underlagt en lovmæssighed, der kaldes "Time-Temperature Superposition Principle". Det betyder, at målinger ved forskellige temperaturer og påvirkningsfrekvenser kan erstatte hinanden. Det er blandt andet baggrunden for, at målingerne udført ved forskellige temperaturer med frekvenser (fra 0,01 Hz til 10 Hz for 30 °C til 100 °C og fra 0,1 Hz til 10 Hz for -5 °C til 55 °) kan sammenstilles til én masterkurve ved 40 °C dækkende en reduceret frekvens fra 10^{-4} Hz til 10^6 Hz; altså 10 dekaner.

Det betyder også, at selvom figur 10.1 og figur 10.2 er vist med en referencetemperatur på 40 °C, så repræsenterer den venstre ende af frekvens-skalaen fysisk set højtemperatur målingerne (op mod 100 °C), mens den højre ende af skalaen repræsenterer lavtemperatur målingerne (ned mod -5 °C). Det forhold er interessant at vide, når der skal foretages en tolkning af de rheologiske målinger.

Undersøgelsen giver også i beskedent omfang mulighed for at vurdere et aspekt ved valg af udgangsbitumen; vil for eksempel bløde bitumener, der er hærdet lidt som følge af asfaltproduktion og udlægning samt simulering

af nogle år på vejen svare til hårdere udgangsbitumener, som er destilleret under lidt højere temperaturer/dybere vakuum i raffinaderiet? Derfor er det også interessant at lave en sammenligning mellem de hærdede udgaver af 100/150 og 160/220 med den 40/60 som indgår i undersøgelsen.

Vurderet ud fra masterkurverne for det komplekse forskydningsmodul i figur 10.1, som sædvanligvis benyttes til at beskrive "stivheden" af bindemidlet, kan følgende observationer/tolkninger gøres:

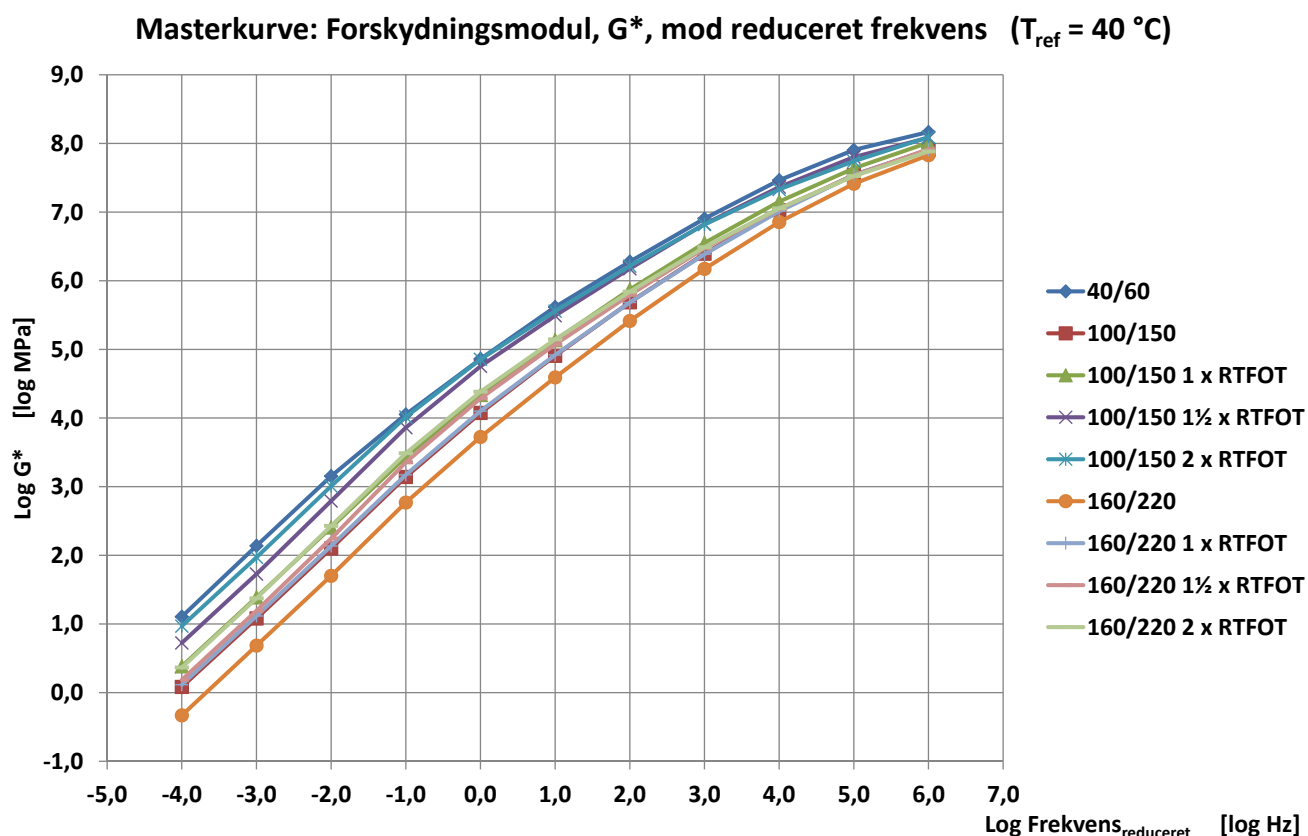
- 40/60 er den stiveste bitumen, mens 160/220 er den blødeste bitumen – begge i den uhærdede udgave
- Med hensyn til stivhed ligger 100/150 hærdet 1½ og 2 x RTFOT meget nær 40/60 (uhærdet)
- Med hensyn til stivhed ligger 160/220 hærdet 1½ og 2 x RTFOT meget nær hinanden
- Med hensyn til stivhed ligger 160/220 hærdet 1 x RTFOT meget nær 100/150 (uhærdet)

Masterkurverne for fasevinkel kan sædvanligvis benyttes til at beskrive "struktur" i bindemidlet. Med "struktur" menes kompleks rheologisk opførsel. Når fasevinklen er 90° eller tæt derpå, opfører materialet sig newtonsk (dvs. uden struktur og uafhængigt af forskydningshastig-

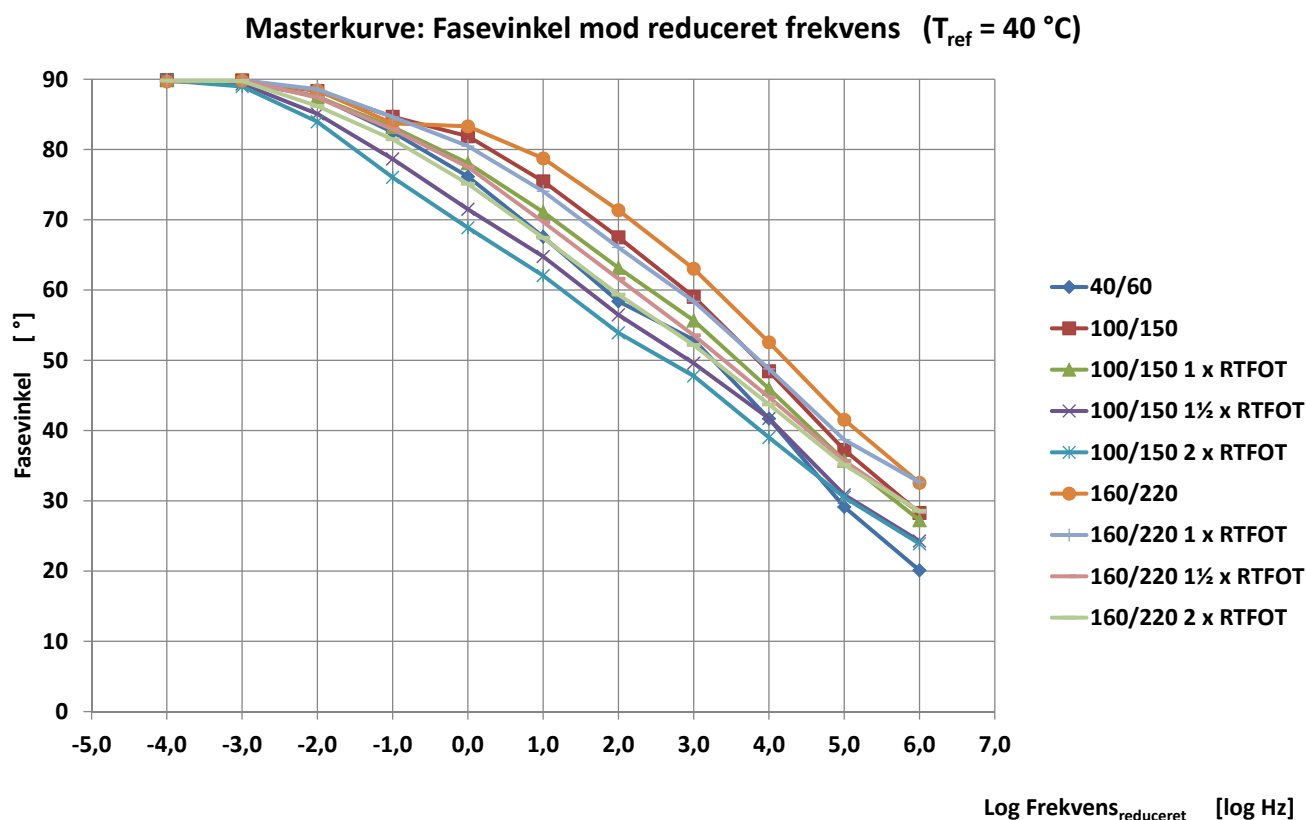
heden). Det forekommer ved høje temperaturer (f.eks. ved blandingstemperaturen for asfalt). Når temperaturen falder, så falder fasevinklen under de 90°, og effekten af "struktur"-dannelse i bindemidlet øges. Det sker i højere og mere udtalt grad ved hærdede prøver (og kan selvfølgelig også fremmes ved tilsætning af andre stoffer som for eksempel polymerer). Derfor er masterkurverne for fasevinkel specielt interessante ved vurdering af hærdede bindemidler. Der kan på baggrund af figur 10.2 gøres følgende observationer/tolkninger:

- "Struktur" for 100/150 er meget lig 160/220 hærdet i RTFOT (svarende til korttidshærkning)
- "Struktur" for 100/150 1 x RTFOT er meget lig 160/220 1 x RTFOT
- Ved temperaturer over 15 °C: "Struktur" for 40/60 er meget lig 160/220 2 x RTFOT (svarende til reduceret frekvens fra 10⁻⁴ Hz til 10³ Hz)
- Ved lave temperaturer (< 5 °C): "Struktur" for 40/60 er meget lig 100/150 hærdet 1½ eller 2 x RTFOT (svarende til reduceret frekvens fra 10⁻⁴ Hz til 10⁰ Hz)

Der findes god sammenhæng mellem stivhed (logaritmen til det komplekse forskydningsmodul) og bindemidlets "struktur" (fasevinkel) for fastholdt reduceret frekvens. Det gælder i særlig grad, når den fysiske temperatur



Figur 10.1: Beregnede masterkurver for forskydningsmodul, G^* , mod reduceret frekvens i en log-log afbildning [34].



Figur 10.2:

Beregnete masterkurver for fasevinklen mod logaritmen til reduceret frekvens [34].

sænkes, så newtonsk rheologisk opførsel ikke længere er dominerende. Når den reducerede frekvens kommer over 1 Hz (svarende til 10^0 Hz og op mod 10^6 Hz), så ligger forklaringsgraden af den lineære sammenhæng typisk på 75 % eller højere.

Sammenhængen mellem bindemidlets "struktur" og dets relation til hærkningsgrad vises, hvor brudpunkt Fraass-temperaturen holdes op imod fasevinklen. Her er det også specielt den ende af det reducerede frekvensinterval, der knytter sig til de fysiske lavere temperaturer, som udviser høj forklaringsgrad (ca. 60 %), idet frekvensområdet for de fysiske rheologiske målinger, der er udført ved den laveste temperatur (-5 °C) svarer til reduceret frekvens fra 10^4 Hz til 10^6 Hz.

Kemiske målinger

Infrarøde spektre kan opfattes som kemisk analyse, da de viser noget om funktionelle, kemiske grupper i materialet. Figur 10.3 viser som eksempel udsnittet af absorbansen fra 1.800 cm^{-1} til 400 cm^{-1} for det infrarøde spektrum for en af prøverne (160/220 1 x RTFOT). Det pågældende spektrum viser ved hvilke bølgetal (cm^{-1}), der sker absorption af det reflekterede lys fra materialets overflade. I intervallet 1.800 cm^{-1} til 1.500 cm^{-1} findes typisk absorptionerne fra covalente dobbeltbindinger, mens intervallet 1.500 cm^{-1} til 400 cm^{-1} kaldes "fingeraftryks"-området,

som er et kompleks mønster af svagere absorptioner fra covalente enkeltbindinger.

På baggrund af dette og tilsvarende spektre for de andre bitumener er forskellige indices beregnet, som i henhold til [2] forventes at beskrive følgende sammensætningsmæssige forhold til karakterisering af bitumen:

Factor of Carbonyls

Vurdering af carbonyl-grupper, som igen muligvis kan relateres til oxidativ hærkning af bindemidlet

Aromaticity Index

Vurdering af indholdet af aromater i bindemidlet.

1-substituted Aromatic Index

Vurdering af antallet af sidekæder til det aromatiske ring-system, som sidder i ringsystemets position 1.

3-substituted Aromatic Index

Vurdering af antallet af sidekæder til det aromatiske ring-system, som sidder i ringsystemets position 3.

Condensation Index

Vurdering af størrelsen af ringsystemerne i bindemidlet, som muligvis igen kan relateres til asfaltén-mængden i bindemidlet.

Aliphaticity Index

Vurdering af indholdet af mættede kulbrinter (alifater) i bindemidlet.

Branched Aliphatic Index

Vurdering af indholdet af forgrenede, mættede kulbrinter i bindemidlet.

Long Chain Aliphatic Index

Vurdering af indholdet af lange, lige alifatiske kulbrinter i bindemidlet.

En nærmere diskussion af disse indices og sammenhænge med andre parametre findes i [34]. I et oxidativt hærkningsstudie som dette har indekset Factor of Carbonyls en vis betydning, men ellers kan der generelt siges, at de i [35] beskrevne indices formentlig er bedre til at illustrere forskelle mellem bitumener fra forskellige råolier og/eller feedstocks end mellem bitumenhårdheder af stort set samme oprindelse.

10.5 "Tommelfinger"-regler og fortolkninger

Baggrund

Mange fagområder kan have generaliseringer, der minder om "lovmæssigheder", men disse må i mange tilfælde opfattes som "tommelfinger"-regler, der gælder, "hvis alt andet er lige" eller "for én parameter ud af mange". Det giver desværre mulighed for fortolkningsproblemer af forskellige forhold.

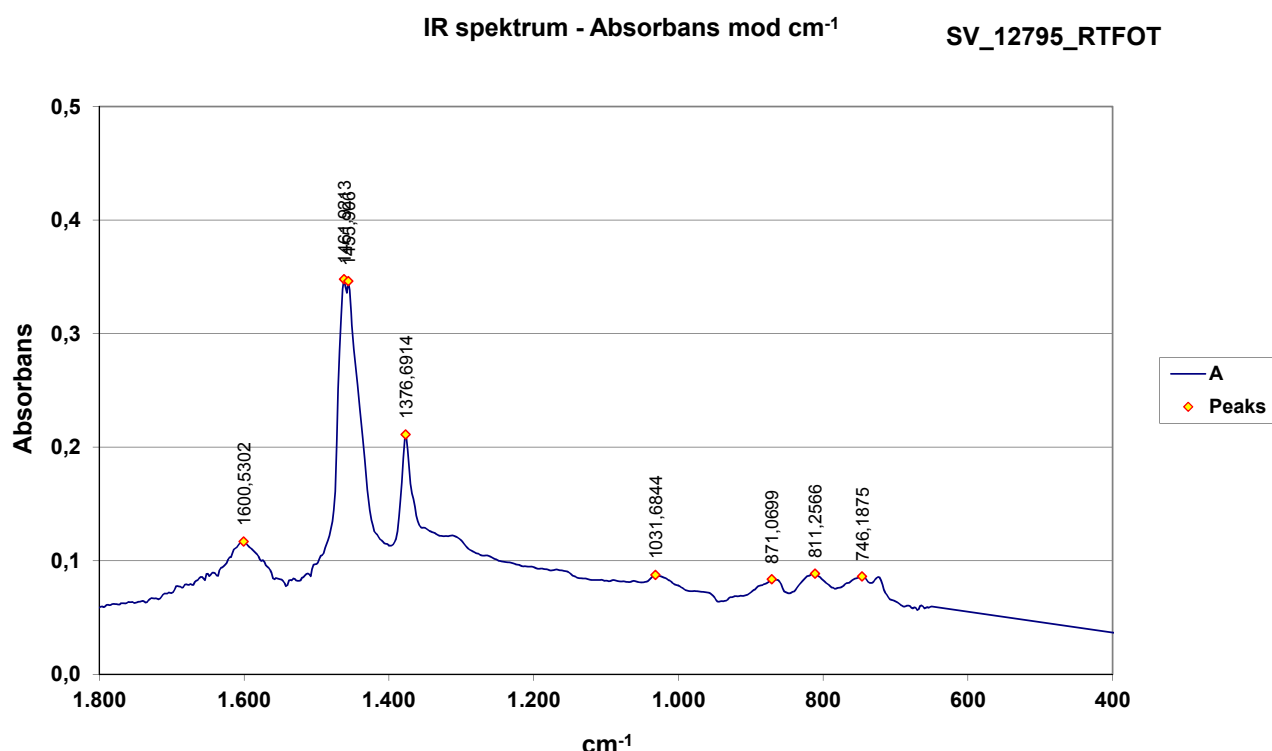
Disse "tommelfinger"-regler stammer ofte fra en tid, hvor

dokumentationsgrundlaget har været noget mangelfuldt.

Et andet forhold kan være, at "tommelfinger"-reglen bygger på en tekstmæssig slagkraftig formulering, som der var belæg for i det undersøgte interval af en prøvningsmetode, men hvor udtalelsen senere antages dækkende udenfor det undersøgte område, måske på prøver af anden oprindelse og for andre prøvningsmetoder.

Et tredje forhold er, at "tommelfinger"-regler i tidens løb kan bygge på en kæde af andre regler/antagelser, så der til sidst kan opstå noget "slør"/usikkerhed i validiteten. Et eksempel:

1. I dag benyttes DS/EN 12607-1 Rolling Thin Film Oven Test til simulering af hærkning af bitumen under produktion i et asfaltfabrik.
2. Sædvanligvis antages det dog, at metoden dækker både produktion, silolagring og udlægning af asfalten.
3. Den nuværende prøvningsmetode DS/EN 12607-1 er fra 2007 og er en europæisk variant af en amerikansk prøvningsmetode ASTM D-2872 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT).
4. ASTM D-2872 RTFOT blev oprindeligt indført i 1970 som givende "samme påvirkning" som en anden hærkningsmetode ASTM D-1754 Thin Film Oven Test (TFOT).
5. ASTM D-1754 TFOT blev indført i 1960 efter sam-



Figur 10.3:

Infrarødt spektrum for bitumen 160/220 hærdet 1 x RTFOT med angivelse af placering af visse toppe (peaks) [34].

menligningsstudier mellem genindvundne bitumener (penetration og blødhedspunkt kugle og ring) fra amerikanske asfaltfabrikker (batch plants) i 1950'erne.

Der kan være langt fra råvarer og asfaltteknologi i 50'ernes USA til forholdene i Danmark anno 2014.

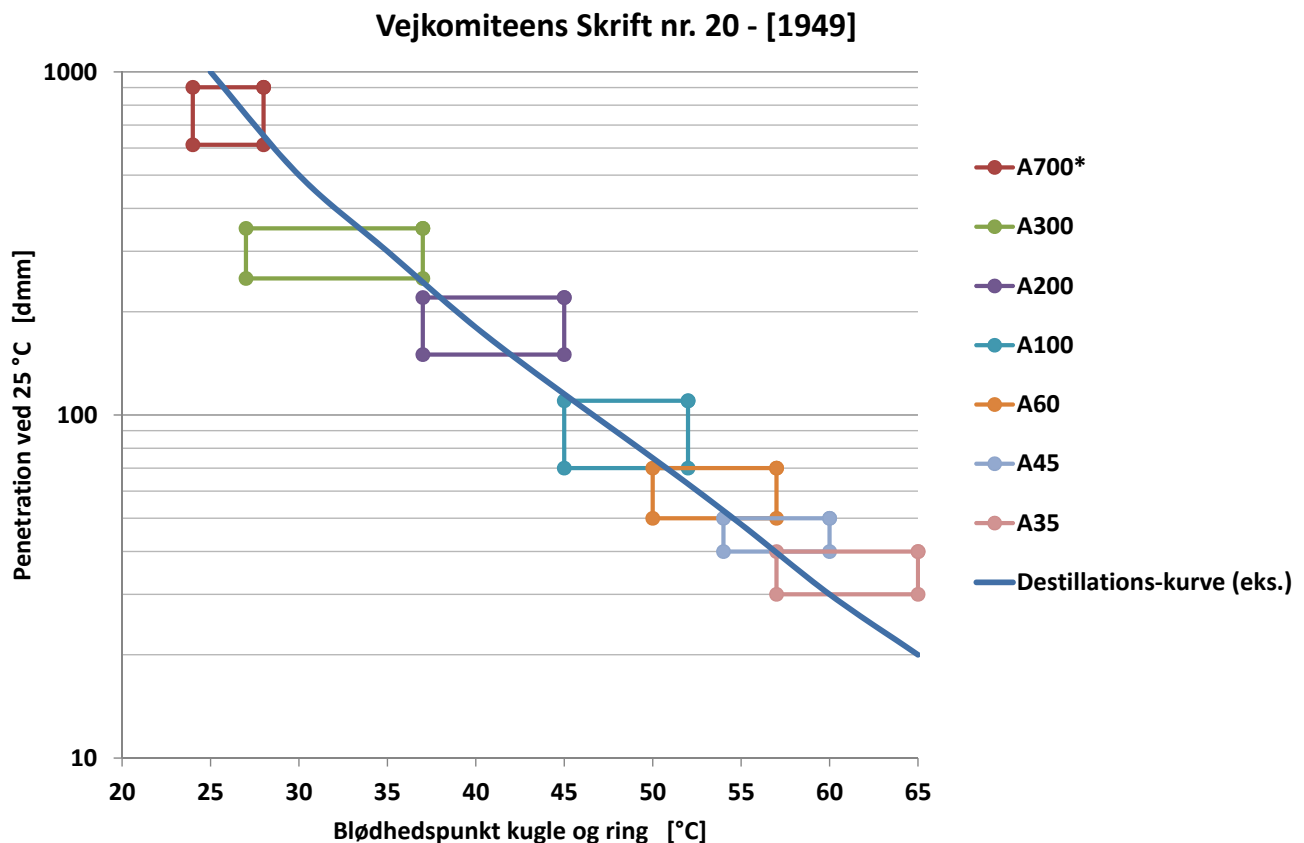
Et fjerde forhold kan være tvivl om reference. Der findes en "tommelfinger"-regel indenfor hærkning af bitumen, som siger: "En bitumen "flytter sig" én penetrationsklasse mod et hårdere bindemiddel ved produktion og udlægning af asfalt". Formodentlig bygger denne "tommelfinger"-regel på erfaringer fra genindvundne bitumener, der med penetration og blødhedspunkt kugle og ring som eneste prøvninger blev sammenlignet med penetrationsklasser af bitumen. Figur 10.4 viser med en idealiseret destillationskurve for en "straight run" destilleret bitumen, hvordan den under hårdere og hårdere destillationsbetingelser "flytter sig" ned igennem penetrationsklasserne, som de blev beskrevet i Vejkomiteens Skrift nr. 20 fra 1949 [37].

Disse penetrationsklasser har stort set ikke ændret sig fra tiden for [37] (1949) over den fællesnordiske bitumenspecifikation (1976) [36] til DS/EN 12591:2009, som er den nugældende, europæiske bitumenspecifikation. Et uddrag fra DS/EN 12591 ses i tabel 10.2, men

det dækker faktisk også de tilsvarende bitumener i [37] og [36]. Når [36] nævnes i denne forbindelse skyldes det, at den var udgangspunkt for Vejregel for varmbladet asfalt (december 1986) [38], hvor Danmark officielt tillempede et uddrag af den fællesnordiske bitumenspecifikation, som de facto også havde været anvendt i Danmark siden starten af 1980'erne. En del af tabellen fra [38] er vist i tabel 10.3. Den viser, at der ikke var nogen penetrationsklasse for intervallet 100-145 x 0,1 mm, samt at der ikke var nogen penetrationsklasser, som overlappede hinanden. Det skabte en anden sammenstilling af penetrationsklasser, da B180 (145/210) blev "nabo" til B85 (70/100).

Når "tommelfinger"-reglen udtaler at "en bitumen "flytter sig" én penetrationsklasse mod et hårdere bindemiddel ved produktion og udlægning af asfalt", er det væsentligt at vide, om erfaringsgrundlaget er med reference til penetrationsklasse-rækken i tabel 10.3 eller i tabel 10.2. Det synes at være en dominerende opfattelse, at "tommelfinger"-reglen knytter sig til tabellen fra Vejregel for varmbladet asfalt (dec. 1986), da denne tabel i praksis var gældende i mere end to årtier i Danmark og netop ikke havde overlappende penetrationsklasser.

Baggrunden for "tommelfinger"-reglen har sikkert også bygget på mellemeuropæiske erfaringer, som har benyttet en sammenhængende penetrationsklasserække



Figur 10.4: Penetrationsklasser fra Vejkomiteens Skrift nr. 20 med idealiseret eksempel på destillationskurve for typisk "straight run" destilleret bitumen. * A700 var dog ikke med i [37].

for penetrationer på 100 x 0,1 mm og hårdere, og som formentlig ikke har taget blødere bitumener i betragtning. Syd- og Centraleuropa opfatter stadig 70/100 som en blød bitumen til veje med trafik af betydning.

"Tommelfinger"-regler i denne undersøgelse

Undersøgelsen giver mulighed for – på bitumener fra en enkelt leverandør – at vurdere gyldigheden af følgende:

1. "Tommelfinger"-regel, at bitumen ændrer sig én penetrationsklasse i hårdere retning som følge af brug ved asfaltproduktion og udlægning,
2. "Tommelfinger"-regel om, at en blødere udgangsbitumen (bl.a. ved modificering) giver længere holdbarhed end en hårdere, thi selv om begge hærder noget under produktion og udlægning, vil førstnævnte i asfalten efterfølgende begynde på et mindre hærdet (blødere) udgangspunkt og dermed have mere "at hærde af" over tid og
3. Er moderat hærdede versioner af bløde bitumener "identiske" med hårdere originalbitumener, der er fremstillet i et raffinaderi?

"Tommelfinger"-regel nr. 1

Der er tre udgangsbitumener i denne undersøgelse: 40/60, 100/150 og 160/220. De to sidstnævnte er som tidligere beskrevet udsat for forskellige tidslængder af hærkning (Rolling Thin Film Oven Test) i laboratoriet, som skal simulere korttidshærkning (1 x RTFOT) samt begyndende langtidshærkning (> 1 x RTFOT).

"Tommelfinger"-reglen bygger på nogle af de traditionelle bitumen-data, som penetration og blødhedspunkt kugle og ring, der kan ses i tabel 10.1. Vurderingen sker nu på basis af DS/EN 12591 (se uddrag i tabel 10.2), som er den nugældende europæiske bitumenstandard. Dens penetrationsklasser er faktisk i forhold til denne undersøgelse identisk med de tidligere gældende i [37] og [36], men altså afvigende med hensyn til 100/150 i 1980'erne og 1990'erne.

Bitumen 100/150 ligger med en penetration på 102 x 0,1 mm i den hårde ende af det tilladte interval for typen. I forhold til "tommelfinger"-reglen skulle den være blevet til en 70/100, men med en penetration på 60 x 0,1 mm har den flyttet sig helt ned i midten af intervallet for den følgende bitumentype 50/70. Penetrationen af den RTFOT-hærdede bitumen har i forhold til kravet om tilbageværende penetration ikke flyttet sig uacceptabelt. Med 59 % er kravet på mindst 43 % overholdt. Lidt anderledes er det, hvis man vurderer det ud fra blødhedspunkt kugle og ring. Med 44,8 °C ligger værdien som forventet i den øvre ende af det tilladte interval fra 39 °C til 47 °C. Efter RTFOT er blødhedspunkt kugle og ring ændret til 49,4 °C. Da intervallerne for 70/100 og 50/70 er noget overlappende, kan bitumenen med lige stor ret siges at tilhøre begge penetrationsklasser. Stigningen i blødhedspunkt kugle og ring for 100/150 ved RTFOT på 4,6 °C er også langt under de maksimalt tilladte 10 °C.

Bitumen 160/220 ligger med en penetration på 169 x 0,1 mm også i den hårde ende af det tilladte interval for typen. I overensstemmelse med den generelt accep-

ID_nr	Metode og enhed	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetration	DS/EN 1426 [x 0,1 mm]	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220
Blødhedspunkt kugle og ring	DS/EN 1427 [°C]	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43
Brudpunkt Fraass	DS/EN 1427 [°C]	-	≤ -5	≤ -5	≤ -7	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15
Tilbageværende penetration	DS/EN 12607-1 [%]	≥ 55	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Stigning i blødheds- punkt kugle og ring	DS/EN 12607-1 [°C]	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11

Tabel 10.2:

Uddrag af DS/EN 12591 Specifikation for vejbitumener.

ID_nr	Metode og enhed	B20	B30	B45	B60	B85	B180	B300
Penetration	SV, 10.2-1985 [1/10 mm]	15-25	25-35	35-50	50-70	70-100	145-210	250-380
Blødhedspunkt kugle og ring	SV, 10.1-1985 [°C]	59-74	55-68	52-63	49-58	45-54	38-45	33-38

Tabel 10.3:

Uddrag af tabel fra Vejregel for varmblandet asfalt (de lyserøde sider), december 1986 [38].

terede "tommelfinger"-regel er 160/220 med en penetration på 88 x 0,1 mm efter RTFOT flyttet ned i midten af intervallet for bitumentype 70/100. Penetrationen af den RTFOT-hærdede bitumen har i forhold til kravet om tilbageværende penetration heller ikke i dette tilfælde flyttet sig uacceptabelt. Med 52 % er kravet på mindst 37 % overholdt. Vurderingen af penetrationsklasse efter hærkning ud fra blødhedspunkt kugle og ring er analogt til situationen for 100/150. Med 40,8 °C ligger værdien som forventet i den øvre ende af det tilladte interval fra 35 °C til 43 °C. Efter RTFOT er blødhedspunkt kugle og ring ændret til 45,6 °C. Da intervallerne for 100/150 og 70/100 er noget overlappende, kan bitumenen med lige stor ret siges at tilhøre begge penetrationsklasser. Stigningen i blødhedspunkt kugle og ring for 160/220 ved RTFOT på 4,8 °C er også langt under de maksimale tilladte 11 °C.

Hærkningskontrol på varmblandet asfalt ved genindvinning af bindemidlet til vurdering af stigning i blødhedspunkt kugle og ring i forhold til vejreglens krav indebærer ofte, at der kun bliver bestemt blødhedspunkt kugle og ring og ikke samtidigt penetration, da der ikke er krav til det. Disse to eksempler viser, at "tommelfinger"-reglen (med ændring af én penetrationsklasse ved produktion og udlægning af asfalt) kan siges, at være korrekt i forhold til tabellen fra 1986 (tabel 10.3), men hvis laboratoriet også bestemmer penetration på det genindvundne bindemiddel, kan det med lige så stor ret siges, at bindemidlet er "skredet" to penetrationsklasser i forhold til DS/EN 12591.

"Tommelfinger"-regel nr. 2

Overfor regel nr. 2 omfatter undersøgelsen kun to bitumener, 100/150 og 160/220, hvilket er et beskedent datagrundlag til formålet. Ved granskning af data i tabel 10.1 for de to bitumener kan det konstateres, at den omtalte "tommelfinger"-regel er korrekt, idet 160/220 1 x RTFOT er et blødere bindemiddel end 100/150 1 x RTFOT. Det er dog ikke hele sandheden. Hvis man betragter de bindemiddeldata, hvor der tages højde for korttidshærkning og lidt eller noget langtidshærkning (dvs. 1½ x og 2 x RTFOT varianterne), så "overhaler" hærkningen af 160/220 faktisk 100/150. På alle fem parametre (penetration, blødhedspunkt kugle og ring, brudpunkt Fraass, tilbageværende penetration og stigning i blødhedspunkt kugle og ring) er 160/220 2 x RTFOT et mere hærdet bindemiddel end 100/150 2 x RTFOT. Her må der igen erindres om den tidligere bemærkning om uventet rangordning af de forskellige hærkningsvarianter af 100/150.

Den potentielt større hærkningstendens hos de blødere bindemidler kontra de hårdere kan indirekte også aflæses af kravene i bitumenspecifikationen DS/EN 12591. I tabel 10.2 lempes kravene til "hærkningsmodstand" (tilbageværende penetration og stigning i blødhedspunkt kugle og ring) hen igennem rækken af bitumener fra hård til blødere. At kravene lempes betyder selvfølgelig ikke, at alle bitumener opfører sig på denne måde, men

i standarden står implicit, at relativ stor hærkning kan forekomme ved ellers konditionsmæssige 160/220 bitumener. Kravene betyder faktisk, at en konditionsmæssig 160/220 med en penetration på 180 x 0,1 mm kan hærde til 67 x 0,1 mm efter produktion af asfalt og have en stigning i blødhedspunkt på 10-11 °C. Sidstnævnte står i kontrast til vejreglens krav om maksimal stigning i blødhedspunkt kugle og ring på 6 °C ved produktion af asfalt (8 °C ved pulverasfalt med endnu blødere udgangsbindingemidler). Det er næsten også ved at "konflikte" med "tommelfinger"-regel nr. 1 om, at bindemidlet ændrer sig én penetrationsklasse ved asfaltproduktion og udlægning, da det hærdede bindemiddel lige netop er hårdere end 70/100.

"Er let hærdet, blødt bindemiddel identisk med en hårdere udgangsbitumen?"

Undersøgelsen har ikke fokuseret på at hærde de to bløde bitumener, 100/150 og 160/220, så de præcist opnåede den samme "hårdhed", som den undersøgte udgangsbitumen 40/60. Af de udførte hærkninger på de to bløde bitumener kan to varianter dog bruges som eksempler, hvis de betragtede prøver skal kunne tilhøre samme penetrationsklasse. Udgangsbitumenen 40/60 har en penetration på 48 x 0,1 mm, hvilket betyder, at 100/150 1 x RTFOT med en penetration på 60 x 0,1 mm og især 160/220 1½ x RTFOT med en penetration på 46 x 0,1 mm kan bruges til sammenligningen.

De tre bitumener 40/60, 100/150, 1 x RTFOT og 160/220 1½ x RTFOT ligner altså ved en grov sammenligning baseret på penetration og blødhedspunkt kugle og ring hinanden, men andre forhold viser, at det er en overfladisk betragtning. Sidstnævnte understøttes også af de hærkningsstudier, som André Van Hasselt, BRRC, udførte ved udviklingen af en anden langtidshærkningsmetode, RCAT (DS/EN 15323 Rotating Cylinder Ageing Test) [39]. Han konkluderede, at simuleret langtidshærkning ved temperaturer over 85 °C ikke giver et korrekt billede, da højere temperaturer muliggør andre bitumenkemiske reaktioner, som ikke finder sted ude i felten. Det må også i det følgende erindres, at mens bitumenen 40/60 er en "stabil" lagerbitumen, repræsenterer de to andre bindemidler et øjebliksbillede set i et påbegyndt hærkningsforløb med mulighed for tilstedeværende hærknings-precursorer (hærkningsfremmere).

Som modargument for at lettere hærdede bitumener ikke er identiske med lidt dybere destillerede bitumener fra raffinaderiet, kan fra denne undersøgelse nævnes følgende:

- Lav-temperatur-egenskaberne (vurderet ved brudpunkt Fraass) er væsentlig forskellige. 100/150 1 x RTFOT har stadigvæk bedre kuldeegenskaber end de to andre, men den vil ved lidt mere hærkning nærme sig 160/220 1½ x RTFOT på et niveau af -11 °C til -13 °C. Ved yderligere hærkning vil de formodentlig stige op mod 40/60's niveau på -7,5 °C. Hvad der

senere vil ske, og om hvordan 40/60 udvikler sig ved hærkning i forhold til de to andre med hensyn til brudpunkt Fraass er ukendt.

- De rheologiske egenskaber bestemt ved Dynamic Shear Rheometer (DSR) i figur 10.1 og figur 10.2 viser sig også at være forskellige:
 - Ved lave reducerede frekvenser (svarende til høje belægningstemperaturer) har 40/60 en tydelig højere stivhed end de to andre, som dog heller ikke er identiske vurderet ud fra det komplekse forskydningsmodul.
 - Ved høje reducerede frekvenser (svarende til de laveste måletemperaturer (dvs. -5 °C)) er der tydeligt en rangordning af bitumenene ud fra deres fasevinkler, der beskriver prøvernes "struktur", der igen senere forventes at lede til sprødhed og dårligere kuldeegenskaber. 40/60 har den laveste fasevinkel, og der blev fundet lineære sammenhænge mellem brudpunkt Fraass og fasevinklen.
- Ved de kemiske målinger (indices baseret på infrarøde spektre af bitumenene) skiller prøverne sig ud på parameteren Factor of Carbonyls, som direkte relaterer sig til oxidativ hærkning. Der er en indikation af, at 160/220 1½ x RTFOT har en klart større værdi end de to andre.

10.6 Konklusion og perspektiv

Det er entreprenørens ansvar at vælge det rette (optimale) bindemiddel til asfaltermaterialerne, hvilket ikke mindst er vigtigt for de åbengraderede tynde asfaltslidlag med støjreducerende egenskaber. Til disse vælges derfor ofte en polymermodificeret asfalt, men selvom der kan forekomme en beskeden nedbrydning af polymeren, er langtidshærdningen ofte domineret af forhold ved udgangsbitumen. Denne er gerne valgt som en relativ blød bitumen, da polymertil sætning bibringer det samlede bindemiddel den nødvendige stivhed. Der er derfor fokuseret på forholdene for udgangsbitumen i disse laboratorieforsøg, da håndtering af hærdede polymermodificerede bindemidler fra vej introducerer større statistisk spredning i data. I modsat fald ville det nødvendiggøre en meget større undersøgelse, end der i dette projekt var sat ressourcer af til.

I et samarbejde med NCC Roads A/S er der undersøgt hærkningsforhold for tre bitumener med varierende hårdhed (40/60, 100/150 og 160/220) med traditionelle bitumenprøvninger, rheologiske målinger (DSR) og kemiske målinger (IR spektre). De tre bitumener stammer fra samme leverandør og formentlig samme oprindelse, hvilket både er en styrke og en mulig begrænsning med hensyn til, hvor universelt dækkende konklusionerne kan være. Undersøgelsen har forsøgt at vurdere og sætte fokus på nogle "tommelfinger"-regler og antagelser, som man ofte træffer på ved valg af bindemiddel til asfalt.

- "Tommelfinger"-reglen om, at en bitumen kun ændrer sig én penetrationsklasse under produktion og udlægning af asfalt skal klart benyttes med en vis reservation, hvis reference er penetrationsklasserne fra den nugældende bitumenspecifikation (DS/EN 12591), som indeholder 100/150 samt overlappende penetrationsklasser. Det kan være korrekt ud fra en vurdering med blødhedspunkt kugle og ring alene, men ved en kombination af penetration og blødhedspunkt kugle og ring, kan de tilsyneladende egenskaber godt betyde et skift på to penetrationsklasser (mod hårdere bitumen). I forhold til den europæiske bitumenspecifikation kan bløde bitumener godt konditionsmæssigt ændre sig flere penetrationsklasser!
- "Tommelfinger"-reglen om, at en blødere udgangsbitumen giver et blødere udgangspunkt for asfalten og bedre "hærkningsmodstand", der kan medføre længere holdbarhed, skal håndteres med varsomhed. Undersøgelsen indikerer, at "tommelfinger"-reglen måske er korrekt med hensyn til korttidshærdningen (dvs. det der sker under produktion og udlægning), men ved den efterfølgende langtidshærdning kan ændringerne i bindemidlet måske føre til, at det på længere sigt havde været mere optimalt at vælge en mindre blød udgangsbitumen.
- Selvom traditionelle konsistensmålinger som penetration og blødhedspunkt kugle og ring kan indikere, at moderat hærdede, bløde bitumener ligner hårdere original bitumener fra et raffinaderi, viser undersøgelsen, at der er klare afvigelser med hensyn til kuldeegenskaber, rheologiske opførsel, samt dens "struktur" og hærkningstilstand ved kemiske målinger. Ved valg af et hårdt bindemiddel peger undersøgelsen på, at 40/60 er et bedre udgangspunkt end moderat hærdede versioner af enten 100/150 eller 160/220.

Undersøgelsen viser, at det er en vanskelig opgave at vælge det optimale bindemiddel, der sikrer god hærkningsmodstand og dermed god holdbarhed ud fra simple prøvninger. Undersøgelsen viser, at det kan være formålstjenligt at inddrage andre prøvningsmetoder end blot penetration og blødhedspunkt kugle og ring til foretagelse af det optimale valg. Der kunne være tale om forskellige rheologiske målinger med DSR. Simulerede langtidshærdninger (f.eks. Pressure Ageing Vessel) kan bidrage til et mere fuldstændigt billede af det optimale valg af bindemiddel.

11. Opsamling og diskussion

Denne rapport omhandler optimering af tyndlagsbelægninger. Der har i de senere år i nogle tilfælde vist sig problemer med holdbarheden af nogle støjreducerende tynde slidlag. Disse problemer er bl.a. identificeret som følgende:

1. De støjreducerende slidlag anvender en lille maksimal stenstørrelse, typisk på 6 eller 8 mm, for at reducere dæk/vejbane-støjen. Da belægninger normalt konstrueres med en tykkelse på omkring 3-4 gange den maksimale stenstørrelse resulterer dette i slidlag med en lille tykkelse på omkring 18 til 24 mm. Slidlag med denne lille tykkelse stiller store krav til jævnheden af det bærelag/binderlag hvorpå de udlægges. Dette kan bl.a. gøre sig gældende ved udlægning af et tyndt slidlag på en overflader, hvor det gamle slidlag er bortfræset. Hvis underlaget er ujævnt, kan det medføre, at slidlaget i nogle områder får en væsentlig mindre tykkelse end den planlagte og det kan betyde, at slidlaget i et sådant område bliver mindre modstandsdygtigt over for påvirkning fra dæk samt vand og temperaturforhold.
2. De støjreducerende slidlag har en åben overfladestruktur, for at reducere dæk/vejbane-støjen. Det betyder, at bindemidlet i belægningsoverfladen er mere eksponeret for luftens ilt end tættere slidlag. Dette kan fremme en hærdning af den anvendte bitumen, som på sigt kan medføre stentab og nedbrydning af slidlaget.
3. Den åbne overfladestruktur kan betyde, at der dannes små porer i slidlagets samlede tykkelse, hvor der kan trænge vand ned. I vinterperioder med frost kan det føre til en nedbrydning af slidlaget.

Europæiske erfaringer

For at afdække den seneste udvikling på området i Europa blev der i april 2013 foretaget en scanning tur til Tyskland, Schweiz, Frankrig samt Holland. Der er rundt i Europa konstateret reduceret levetid for støjreducerende tynde slidlag. I nogle tilfælde er der opstået skader, bl.a. i løbet af vinterperioden. Dette skyldes ofte en kombination af flere forhold, hvor følgende kan fremhæves:

1. At et tyndt slidlag er blevet udlagt på et ujævnt underlag af dårlig kvalitet
2. At der ikke var en god membran, som sikrer, at der

ikke trængte vand ned i binderlaget. Den delvist åbne struktur og lille lagtykkelse kan medføre, at vand trænger i gennem slidlaget og ned i binderlaget, hvor der kan forekomme skader i vinterperioden pga. frostsprængninger

3. At der forekommer drejende/vridende trafik
4. At udlægning fandt sted forholdsvis sent på året

Der foregår løbende forsknings- og udviklingsaktiviteter for at udvikle bedre støjreducerende slidlag med optimeret støjreduktion og god fysisk holdbarhed. Der er fokus på at forbedre langtidsstøjdæmpningen og holdbarheden. Akustisk optimering af støjreduktionen for tynde slidlag kan bl.a. foretages ved at anvende:

1. Lille maksimal kornstørrelse typisk 6 eller 8 mm. 4 mm er dog også anvendt med god støjdæmpning
2. Et stort indbygget hulrum som for tyndlagsbelægninger ligger 8-12 % med halvåbne porer. Hulrum over 18-20 % anvendes dog også, især for belægninger med 4 mm stenmaterialer

Optimering af holdbarheden for tynde støjreducerende slidlag kan på baggrund af viden indsamlet på studierejsen foretages ved at anvende følgende retningslinjer:

1. Lagtykkelsen skal ikke være under 30 mm
2. Typisk Marshall-hulrum 8-12 % som halvåbne porer med en åben overfladetekstur
3. Slidlag kan udvikles i en tykkelse der er væsentligt større end 3-4 gange den maksimale kornstørrelse uden at risikere sporkøring
4. Slidlaget skal udlægges på nyudlagt underlag (typisk binderlag) eller på et gammelt slidlag i god stand
5. Fræset overflade er speciel kritisk og skal undgås. Hvis det benyttes, skal det være fintandet fræsning, og ujævnheden fra rillerne på fræset overflade må maksimalt være 3 mm
6. Underlaget skal have det korrekte profil. Tynde, støjreducerende slidlag kan ikke benyttes til opretning

7. Der skal anvendes en forholdsvis høj procentdel bindemiddel
8. Der skal anvendes elastomermodificeret bitumen, som skal være færdigfremstillet (i henhold til DS/EN 14023) og ikke "in-situ" tilvirket
9. Der anvendes ikke genbrug i tynde, støjreducerende slidlag
10. Slidlag udføres fra 15. april til 15. september
11. Forseglingsemulsion er nogle gange anvendt, men der er ikke nogen bevist effekt på holdbarheden, men man vurderer dog i Holland en forbedring af levetiden på 1-3 år
12. God klæbning til underlaget er essentielt samt et jævnt underlag
13. Man skal sikre, at vand fra åbne belægninger ikke trænger ned i underlaget
14. Hvis penge til slidlagsarbejder "frigøres" efter 1. september, bør de anvendes til nye binderlag, hvor nyt slidlag kan udlægges den følgende sommer. Denne strategi er bedre end sent udførte SRS-slidlag
15. Man skal undgå udførelse af håndudlægning
16. Uddannet og erfarent personale på udlæggerholdet, da det kræver speciel erfaring at udlægge et tyndt støjreducerende slidlag
17. Støjreducerende, tynde slidlag skal undgås, hvor der forekommer drejende trafik samt opbremsende/accelererende trafik, i og ved rundkørsler, på kørebaner med forventede stop (betalingsanlæg, busholdepladser etc.) samt på opmarchbåse til trafiklysregulerede kryds etc.

Belægninger med 4 mm stenstørrelse

I forhold til SRS-klassificeringen viser støjmålinger på nogle udvalgte strækninger at slidlagene med 4 mm maksimal stenstørrelse i disse tilfælde falder i tre grupper:

- SMA 4 som netop ikke opnåede nogen SRS klassificering

- SMA 4+8 som i to tilfælde opnåede en SRS-standard klassificering

- Et slidlag med 4 mm sten som opnåede en SRS-speciel klassificering

Spektrale analyser af støjen indikerer, at slidlaget der opnåede SRS-speciel klassificering som nyt, har en meget jævn overfladetekstur, der reducerer den vibrationsgenererede støj. Det har samtidig en meget åben overfladestruktur, som markant reducerer den luftpumpe-genererede støj – endda så meget, at slidlaget formodentlig har en åben porestruktur i hele slidlagstykkelsen tilsvarende en drænasfalt-type. Den årlige stigning af støjen ligger på 1,0 dB, hvilket er markant mere end de 0,5 til 0,7 dB/år, der normalt observeres for åbne tynde slidlag. Stigningen skyldes formodentlig, at den åbne porestruktur tilstoppes over de første år af slidlagets levetid samt at belægningsoverfladen bliver mere ru, hvilket bl.a. kan skyldes et begyndende stentab.

Et kig ned i belægningsstrukturen

Støjreducerende egenskaber hænger uløseligt sammen med slidlagets overfladetekstur og luftporestruktur. Disse forhold kan kvalitativt visuelt afdækkes gennem tynd- og planslib, som har været benyttet i gennem mange år til vurdering og erfaringsudvikling af de støjoptimerede, tynde slidlag. Samtidig har teknikken på udførte forsøgs- og demonstrationsstrækninger hjulpet med at fokusere på produktionstekniske forhold og deres indflydelse på den materiale-mæssige sammensætning. Det har betydning for den fysiske holdbarhed af belægningsmaterialer; herunder også kvaliteten af udlægning på underliggende lag.

På tværs af de foretagne undersøgelser igennem årene på forskellige støjreducerende tynde slidlag har teknikken indikeret tre væsentlige forhold:

- Cellulosefibre bruges ofte i disse belægningsmaterialer, og det er essentielt, at asfaltmaterialerne blandes tilstrækkeligt længe til at sikre, at der ikke "efterlades" uomhyllede fiber-klumper, som specielt i de tynde lagtykkelser meget hurtigt kan få negative konsekvenser for den fysiske holdbarhed
- Den støjreducerende overfladetekstur skabes ofte gennem et stenskelet, og tynd- og planslibsteknikken kan vise, hvis der er valgt en uhensigtsmæssig

kombination af overdreven vibrationstromling og utilstrækkelig styrke i det anvendte stenmateriale gennem afsløring af knuste flader uden bindemiddel i materialet

- Ved udlægning af de tynde støjreducerende slidlag skal der i særlig grad sættes fokus på anvendelse af stenmel som slipmiddel på lastbilslad, da overdreven eller forkert dosering kan efterlade spor af uomhylllet, fint stenmateriale, der hurtigt kan nedsætte den fysiske holdbarhed. Her spiller også valg af type af lastbilslad og uddannelse af chaufførerne ind.

Måling af overfladetekstur

Der har været et behov for at kunne måle eller vurdere støjen fra de prøveplader, som blev produceret i løbet af projektet. Det er her ikke muligt at anvende de almindelige støjmålemetoder. Der er derfor udviklet en metode til at måle overfladeteksturen på laboratoriefremstillede belægningsprøveplader. Der er indkøbt en skinne med en laser med meget høj opløsning, som kan foretage detaljerede overflade-teksturmålinger både på prøveplader i laboratoriet samt på slidlag ude på vejene. Måleudstyret, som kaldes "In-situ-TEX", er blevet afprøvet og indkøbt. Det var planen at bruge tekstur som input-data til den hollandsk udviklede beregningsmodel Acoustical Optimaziation Tool (AOT), der på baggrund af målinger af belægnings overfladetekstur skulle kunne beregne det forventede støjniveau for en vejbelægning. Der blev derfor gennemført forskellige test af AOT. Konklusionen er desværre, at AOT ikke er et særligt præcist beregningsværktøj. AOT kan dog bruges til at rangordne belægnings støjniveau, men modellen kan ikke beregne støjniveau forskelle mellem belægnings, som er forholdsvis ens. Derfor vil det i stedet være nødvendigt at vurdere de støjniveau egenskaber af laboratoriefremstillede belægningsprøver ud fra målinger af belægnings overfladetekstur og analyser af MPD, tekstur-spektre mv.

Test af tynde belægnings med større tykkelse

Med ønsket om at opnå en større støjreduktion har udviklingen vist en trend mod mindre og mindre maksimalstørrelser i belægnings. Dette har langt hen ad vejen kunnet ske uden tab af friktion og dermed uden at sætte trafikikkerheden over styr. Der har i de seneste år været et øget fokus på, at varmeindholdet i belægningsmassen kunne sikre den nødvendige komprimering, og at den udlagte lagtykkelse er tilstrækkelig til at kompensere for

ujævnheder, der eventuelt kunne stamme fra en tidligere fræsning af underliggende lag. Det har ført til et ønske om større lagtykkelser for disse produkter.

Kombinationen af (relativ) stor lagtykkelse og lille maksimalstørrelse har naturligt øget den potentielle risiko for sporkøring i det støjreducerende slidlag. Denne bekymring er i projektet belyst gennem en begrænset undersøgelse af sporkøringens afhængighed af lagtykkelse ved tre udvalgte støjreducerende slidlag. De er afprøvet i lagtykkelser over fire gange maksimalstørrelsen, som en gammel tommelfinger-regel foreskriver som den maksimale, anbefalelsesværdige lagtykkelse. Undersøgelsen af de tre slidlag, som er optimeret for sporkøringsresistens i normalt udvalgte lagtykkelser, indikerer ikke forøget risiko for sporkøring ved tykkere lag. Det må pointeres, at der her kun er tale om en meget begrænset stikprøve, og at resultatet ikke nødvendigvis er universelt gældende. Det nævnte emne vil blive forsøgt fulgt op i fremtidige undersøgelser af forudsætninger og gyldighedsområder, da prøvningsmulighederne først blev tilgængelige sent i projektets forløb.

Analysen af overfladetekstur

Der er med måleudstyret In-situ-TEX målt tekstur på prøvepladerne af forskellig tykkelse inden sporkøringsforsøgene er foretaget. Teksturmålingerne kan i høj grad anvendes til at beskrive, om der er tale om belægnings med en "negativ" konkav tekstur, som vil have et lavere støjniveau end en belægning med en "positiv" konveks tekstur. Analyserne viser, at der ikke er nogen tendens til, at teksturspektrene for prøvepladerne målt enten i eller på tværs af tromleretningen har højere teksturniveauer end den anden retning. Dette indikerer, at tromlingen af prøvepladerne sikrer en jævn og god tekstur.

For to af de tre testede belægnings må det på baggrund af teksturmålingerne og de spektrale analyser vurderes at tekturen ved pladerne af forskellig tykkelse, men udført af det samme materiale, ikke medfører ændringer af støjniveauerne.

Støjniveau effekt af slibning af slidlags overflader

Det er i dette projekt valgt som et første forsøg at foretage virtuel slibning i et Matlab-program på tre forskellige belægningsprofiler, hvor der i forvejen forelå teksturdata som muliggjorde denne øvelse. Disse tre belægnings er ikke specielt udvalgt med henblik på, at de ville være særligt egnede til forsøg med slibning. Formålet

har derimod været at afprøve den udviklede virtuelle slibningsmetode samt at få nogle første vurderinger af, hvorvidt der er et potentiale for at opnå støjdemping på denne måde. Resultaterne af slibningen viser tydeligvis et potentiale ved at foretage en slibning af belægningernes overflade, for at skabe en mere negativ overfladetekstur. Det største potentiale vises for en poroelastisk belægningen, som i denne sammenhæng repræsenterer en drænasfalt (en porøs belægning (DA 6)), ligesom dem der er blevet slebet på under to fuldskala forsøg i Sverige og Australien. Dette kan indikere, at det er for porøse samt eventuelt andre belægninger med en åben overfladestruktur, at der er det største potentiale i at foretage en slibning af en belægning i forhold til at opnå en støjreduktion. For både forsøgene i Sverige, Australien og den virtuelle slibning, er potentialet for slibningen op til 2-3 dB støjreduktion.

Optimering af bindemiddel

Til sikring af en lang fysisk holdbarhed af de støjreducerende, tynde slidlag er bindemidlet og dets hærtningsforhold en vigtig parameter. Det er entreprenørens ansvar at vælge det rette (optimale) bindemiddel til asfaltmaterialerne, hvilket ikke mindst er vigtigt for de åbengraderede tynde asfaltslidlag med støjreducerende egenskaber. Til disse vælges derfor ofte in-situ elastomermodificering, men selvom der kan forekomme en beskedne nedbrydning af polymeren, er langtidshærdningen ofte domineret af forhold ved udgangsbitumen. Denne er gerne valgt som en relativ blød bitumen, da polymertil sætning bibringer det samlede bindemiddel den nødvendige stivhed.

Valget af bindemiddel styres (desværre) ofte af tommelfinger-regler, hvis dokumentation er yderst beskedne, og hvor gyldighedsområdet fortaber sig i det ukendte. Da bindemidlet er en holdbarhedsmæssig kritisk parameter, er der i dette projekt lavet et hærtningsstudie i en særskilt rapport. Et uddrag af rapporten er medtaget i dette dokument og konkluderer, at flere af tommelfinger-reglerne i højeste grad skal vurderes kritisk og i det enkelte tilfælde udfordres, da der ofte er tale om gamle "regler" og ikke naturgivne dogmer.

Undersøgelserne viser også, at de traditionelle bitumenprøvninger, som penetration og blødhedspunkt kugle og ring, kan være utilstrækkelige (for grove) til at vurdere langtidshærtningsforholdene for bindemidlerne. I det virkelige liv besværes disse forhold yderligere af, at

polymermodificering af asfalten eller bindemidlet vanskeliggør tolkning med traditionelle prøvninger. Rheologiske målinger med Dynamic Shear Rheometer (DSR) og kemiske analyser som infrarød spektroskopi (IR) er nærliggende prøvninger til at sikre det optimale valg af bindemiddel, både her og nu til produktion og indbygning samt på længere sigt til vurdering af hærtningsforholdene. Disse muligheder vil også blive benyttet ved fremtidige accelererede prøvninger til simulering af langtidsholdbarhed, da trenden i de europæiske bindemiddelspecifikationer vil hjælpe udviklingen på vej i denne retning.

12. Litteratur

1. J. Kragh, E. Olesen, H. Bendtsen, E. Nielsen, K. Handberg, U. Sandberg. DVS-DRI super quiet traffic. International search for pavement providing 10 dB noise reduction. Danish Road Directorate, Danish Road Institute. Report 178 – 2009. Se: vejdirektoratet.dk
2. PERSUADE-projektets hjemmeside: <http://persuade.fehrl.org/>
3. H. Bendtsen, R. S. H. Skov, B. Andersen, E. Olesen, A. Neidel, J. Raaberg, J. Cesbron. Performance of PERS at the Kalvehave test site. Vejdirektoratet, rapport 514, 2014. Se: vejdirektoratet.dk
4. 1. generationssystem for udbud og dokumentation af støjreducerende slidlag, "SRS. Vejregel-forberedende rapport, Vejreglerådet, november 2006, revideret januar 2008.
5. 2.G – System for dokumentation af støjreducerende slidlag "SRS". Vejregler. Marts 2013. Se: vejregler.dk
6. L. Goubert, G. Descornet, H. Bendtsen, E. Nielsen, J. Kragh, J. De Visscher. Performance management of low noise pavement, a decision support guide. FTP2 Technical report. ERA-NET ROAD programme. November 2007. Se: eranetroad.org
7. H. Bendtsen. Brug af støjreducerende drænasfalt i Sverige. Artikel [Trafik og Veje, 2012](#)
8. H. Bendtsen. European experience. Winter service of porous asphalt. Report from a Scanning tour May 2011. Vejdirektoratet, notat 123 – 2012. Se: vejdirektoratet.dk
9. H. Bendtsen, J. Oddershede, Q. Lu, A. Rezaie. Prediction of Noise from Laboratory Produced Pavement Slabs. Paper InterNoise 2012
10. ISO 11819-1:1997: Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on road traffic noise – Part 1: The statistical pass-by method
11. ISO 13473-1. Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of Mean Profile Depth. ISO, 1997-09-01
12. J. M. Kirk og O. G. Mikkelsen: Fatigue failures in wearing courses? The Association of Danish Asphalt Industries. Januar 1983
13. C. Petersen, Måling af vejtemperatur med forskellige sensorer i tre vejbelægnings. Vejdirektoratet, rapport nr. 503, 2014. Se: vejdirektoratet.dk
14. H. Bendtsen, B. Andersen, E. Nielsen, B. Wamsler. Europæiske erfaringer med tynde støjreducerende asfaltslidlag. Rapport fra en studietur til Schweiz, Frankrig, Holland og Tyskland. Vejdirektoratet, rapport nr. 129, 2013. Se: vejdirektoratet.dk
15. T. H. Petersen, G. Le Ray. Befolkningsreaktioner på støjreducerende vejbelægnings. Vejdirektoratet, rapport 442, 2013. Se: vejdirektoratet.dk
16. S. N. Thomsen, H. Bendtsen and B. Andersen. Optimized thin layers – urban roads. The Kastrupvej experiment. Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut. Notat 66, 2008. Se: vejdirektoratet.dk

17. H. Bendtsen, B. Andersen, J. Oddershede. Støjdæmpning over lang tid støjreducerende tyndlagsbelægninger. Statusrapport 2010. Vejdirektoratet, Rapport 520, 2014.
Se: vejdirektoratet.dk
18. J. Kragh et. al. User's Guide Nord2000 Road. Delta, SINTEF, SP and VTT
19. J. Kragh, L. Nøhr Michelsen, J. Fryd, J. Jakobsen. NORD2000 – håndbog >>> Beregning af vejstøj i Danmark. Vejdirektoratet. Rapport 434, 2013. Se: vejdirektoratet.dk
20. U. Sandberg and J. A. Ejsmont. Tyre/Road Noise Reference Book. INFORMEX 2002. www.informex.info
21. Jørn Raaberg og Annette Neidel: Øster Søgade – otte år med 2-lags drænasfalt. Vejteknisk Institut, Rapport 168, 2009. Se: vejdirektoratet.dk
22. Jørn Raaberg: Kongelundsvej, Københavns Kommune. Strukturanalyse af asfalt med tynd- og planslib på 16 borekerner. Dokument 10-44, 8. april 2010
23. Carsten B. Nielsen: Ravelling of porous pavements – Assessments of test sections. Danish Road Directorate, Danish Road Institute, Technical Note 48, 2007. Se: vejdirektoratet.dk
24. Jørn Raaberg: Herning II Strukturanalyse af asfalt med tynd- og planslib på otte borekerner. Dokument 10-44, Vejdirektoratet 8. april 2010
25. Annette Neidel: Investigation of COOEE test section, Stensved 2012 – By thin and plane sections COOEE-projekt dokument 10/10995-31, Vejdirektoratet 2013
26. Annette Neidel og Jørn Raaberg: Investigation of COOEE test sections at Svendborg and Langeskov – By thin and plane sections, COOEE-projekt dokument 10/10995-37, Vejdirektoratet 2014
27. Jens Oddershede, Jørgen Kragh, Hans Bendtsen. Road surface texture and tire/road noise – A pilot comparison of prediction and measurement. Proceedings Internoise 2012, New York på CD rom.
28. Hans Bendtsen, Qing Lu, Jens Oddershede, Arash Rezaei. Asphalt pavement texture and noise. Laboratory experiment with Acoustic Optimization Tool. Vejdirektoratet, Rapport 436, 2013. Se: vejdirektoratet.dk
29. Hans Bendtsen, Rasmus Stahlfest Holck Skov, Bent Andersen, Annette Neidel, Jørn Raaberg, Julien Cesbron. Laboratory measurements on PERS test slabs. Vejdirektoratet, Rapport 513, 2014. Se: vejdirektoratet.dk
30. User Manual. Acoustic Optimization Tool. Speron.net. CD ROM, 5 January 2009. M+P Consulting engineers, the Netherlands. Se: <http://www.speron.net/>
31. Acoustic optimization Tool. Speron.net. CD ROM January 5th, 2009. M+P Consulting Engineers, the Netherlands

32. W. Schwanen, H.M. van Leeuwen, H.F. Reinink, A.A.A. Peeters, G.J. van Blokland, W. Kropp. Acoustical Optimization Tool – RE3: Measurement data KloosterZande test track, report M+P. DWW.06.04.8, revision 1, 31 August 2008
33. Hans Bendtsen, Jens Oddershede, Erik Olesen. Demonstration af støjreducerende SRS-belægninger. Se: [Trafik og Veje 2012/04](#)
34. Erik Nielsen: Valg af Bindmiddel til slidlag – Vurdering af hærdningsforhold og "tommelfinger"-regler, Rapport nr. 525, Vejdirektoratet, januar 2015. Se: [vejdirektoratet.dk](#)
35. Nathalie Pieri and Jacky Kister: Chemical characterization of bitumen Ageing by FTIR and UV synchronous fluorescence. Determination of relationships with their rheological properties using Principal Component Analysis, Doktorafhandling, Université Aix-Marseille III, Frankrig 1994
36. NVF Udvalg 31: Forslag til nye asfaltspesifikasjoner for Norden, Rapport fra Bindemiddelkomiteen, Rapport 7/1976
37. Vejkomiteen, Dansk Vejlaboratorium, Leveringsbetingelser og prøvningsmetoder for almindelig asfaltbitumen, cutbackasfaltbitumen og trinidadasfalt til vejbygning, Vejkomiteens Skrift nr. 20, 1949.
38. Vejregel for varmblandet asfalt, Vejledning, december 1986
39. DS/EN 15323:2007 Bitumen og bituminøse bindemidler – Accelereret langtidsældning/konditionering ved roterende cylindermetode (RCAT)
40. Hans Bendtsen. Undersøgelser af drænasfalt som støjreducerende slidlag. Vejdirektoratet. Rapport, 2014. Under publicering
41. EN 12697-22 + A1:2007. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking
42. Almindelig arbejdsbeskrivelse, varmblandet asfalt – AAB, Udbud. Vejdirektoratet, februar 2012
43. Carsten Bredahl Nielsen: Accelerated Pavement Testing – 1999 International Conference. October 18-20, Reno, Nevada, Danish Road Institute, Report 98, 1999. Se: [vejdirektoratet.dk](#)
44. ISO 13473-2. Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis. ISO, 2002-09-15
45. ISO/TS 13473-4. Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 4: Spectral analysis of surface profiles. ISO 2008-05-01
46. U. Sandberg, P. Mioduszewski. The best porous asphalt pavement in Sweden so far. Paper InterNoise 2014
47. M. Buret, J. McIntosh, C. Simpson. Comparative assessment for low-noise pavements by means of the ISO 11819 and the OBSI. Paper InterNoise 2014

Vejdirektoratet har lokale kontorer i:

Aalborg, Flæng, Middelfart,
Næstved og Skanderborg
samt hovedkontor i København

Find mere information på
vejdirektoratet.dk

Vejdirektoratet
Niels Juels Gade 13
1022 København K

Telefon 7244 3333
vd@vd.dk
vejdirektoratet.dk

