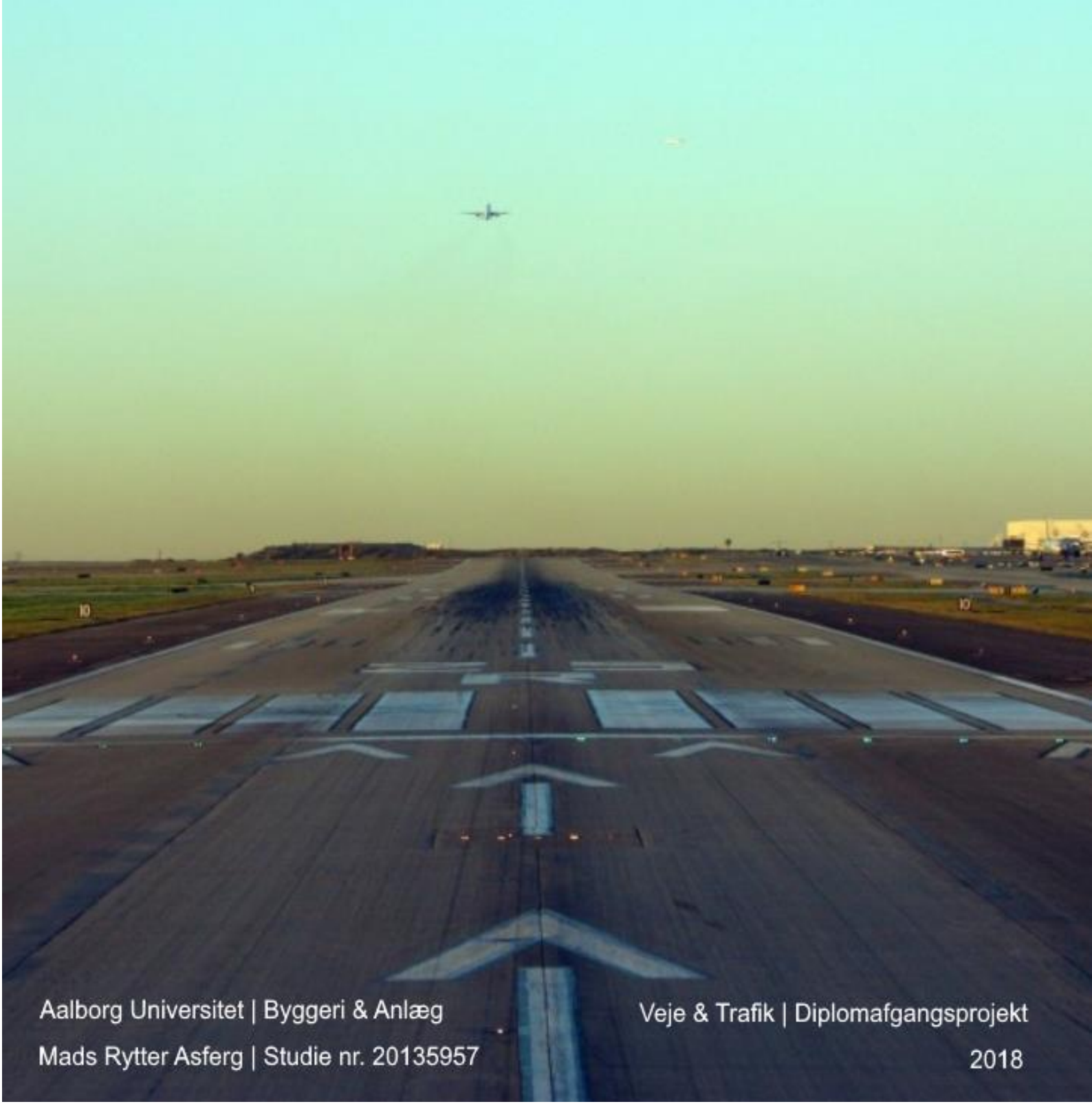


Vejbefæstelser i lufthavne





AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri & Anlæg

Thomas Manns Vej 23

DK - 9220 Aalborg Øst

Tlf. (+45) 9940 8484

E-mail: civil@civil.aau.dk

Titel:

Vejbefæstelser i lufthavne

Projekttype:

Afgangsprojekt på diplomuddannelsen:

Veje & Trafik

Projektperiode:

November 2017 - januar 2018

ECTS:

15

Vejleder:

Lene Faber Ussing

Skrevet af:

Mads Rytter Asferg

Afleveringsdato:

19. januar 2018

Sidetæl:

56

SYNOPSIS:

Flytrafikken vokser og grundet større og tungere flyvemaskiner, nedbrydes de befæstede områder i lufthavne hurtigere og dermed skal der oftere foretages reparationer, hvilket nødvendiggør begrænsning af trafikken.

Rapportens mål er, at undersøge og redegøre for hvorledes vejbefæstelser i lufthavne er opbygget. Læseren introduceres for de grundlæggende elementer i befæstelsesopbygningen af fire forskellige belægningstyper, hhv. fleksible, stive, halvstive og semifleksible belægningsarter. Belægningsarterne sammenlignes indenfor udvalgte funktionskrav, for at kunne bedømme deres egnethed i lufthavne. Dertil opstilles og diskuteres de teoretiske metoder, som ligger til grund for dimensionering.

Rapporten er skrevet sådan, at interesserede læsere formodentlig vil kunne forstå konteksten, men egner sig især godt til de som ønsker viden om vejmaterialer og belægningsopbygning.

Forord

I forbindelse med uddannelsen til diplomingeniør på Aalborg Universitet, Byggeri & Anlæg, med studieretning Veje og Trafikteknik er denne rapport udarbejdet som diplomafgangsprojekt. Projektet omhandler en relevant specifik ingeniøropgave, der tager udgangspunkt i forfatterens praktikforløb.

Rapporten henvender sig til de, som arbejder i vejbygningsbranchen eller med generel interesse indenfor vejbygning og vejbefæstelser. Rapporten præsenterer læseren for emnets grundlæggende begreber, forudsætninger og baggrund for dimensioneringsmetoder af vejbefæstelser og de funktionskrav, der skal tages i betragtning. Projektperioden forløb i perioden 1. november 2017 til 19. januar 2018 og afsluttes med mundtlig eksamen 29. januar 2018.

Læsevejledning

Litteraturhenvisninger er angivet efter Harvard-metoden, med forfatternavn og udgivelses år: (Forfatter, udgivelsesår). Ved tre eller flere forfattere benyttes et al. efter førstnævnte forfatter. Der kan findes flere informationer om de enkelte kilder i litteraturlisten, hvor kilderne er listet alfabetisk efter forfatterens efternavn. Kilden er placeret efter den linje den underbygger, eller efter et helt afsnit, hvis kilden referer til hele afsnittet. Figurer og tabeller er nummeret fortløbende gennem rapporten.

Abstract

The increased international trade and globalization contributes to economic growth, and thus underlines the need for an efficient infrastructure. Combined with inspiration and ideas from an internship at Thule Air Base, the topic of this bachelor project is pavements in airports as they play an important part in securing a functional infrastructure. Since this bachelor project is a literature review the primary method used has been searching for literature, mostly in books, scientific articles and online databases.

Firstly, the structure of general pavement is introduced to the reader. This is followed by a more detailed explanation of the composition and structure for flexible, rigid, semi-flexible and semi-rigid pavement. The pavement types are constructed of a wide range of materials and mixtures of gravel, stone, bitumen, cement or improved soil.

Flexible pavement, as asphalt, are widely used in airports, as it gives good performance and durability under heavily trafficked circumstances. They are highly suitable for use in the construction and surfacing of taxiways and runways on airfields. Asphalts also give good performance and durability under the wide range of climatic conditions. And the use of modified or special binder is widely used for the different asphalts.

The main advantage of asphalt on airfields is the fact that it enables laying operations to be carried out at night with the runway remaining open to aircraft traffic during the day, thus only leaving the runway out of operation for a relatively short time. The main airfields are repaved approximately every 12-15th year. The main reason for repaving is the weather conditions like rain and frost, or the ageing of the binder. The usage of flexible pavement is not always standard for heavy parking areas, where either a rigid or semiflexible pavement are used. The rigid pavement is characterized by its rigidity and high modulus of elasticity. A rigid pavement is made from cement concrete or reinforced concrete slabs. A semiflexible pavement is made from an open porous asphalt skeleton, where the voids is filled with selected cementitious grouts.

The design of airfield pavements and the method used, indicates how the load is determined, the effect of the sum of aircrafts and the method used for designing the layer thickness of the pavement. The heaviest aircraft allowed for the airfield is generally used for the design. The designing of the flexible pavements is usually done by either mechanistic-empirical methods, finite element- or

theoretical programs like Airport Pavement Structural Design System (APSDS). For the empirical methods CBR method (Californian Bearing Ratio) is used.

Flexible pavements appear to be the dominant in the Danish market, while other countries more often use rigid pavement. In this case asphalt versus concrete considerations led to an intense discussion. This report contributes to the discussion about the choice of occupancy types.

Indholdsfortegnelse

Introduktion	1
1 Indledning	2
2 Problemformulering	5
2.1 Afgrænsning	5
3 Metode	7
Erfaringsopsamling	8
4 Vejbefæstelser i lufthavne	9
4.1 Princippet af opbygninger af vejbefæstelser	10
5 Belægningstyper	13
5.1 Fleksible belægninger	13
5.2 Stive belægninger	19
5.3 Halvstive belægninger	23
5.4 Semifleksible belægninger	24
Teknisk analyse	26
6 Funktionskrav	27
6.1 Friktion	27
6.2 Jævnhed og profil	29
6.3 Bæreevne	30
6.4 Økonomi	31
7 Erfaringer i danske lufthavne	34
8 Tendenser i udlandet kontra Danmark	36
Teoretisk analyse	38
9 Dimensionering af vejbefæstelser	39
9.1 Forudsætninger for dimensionering	40
9.2 Den mekanistisk-empiriske metodes ækvivaleringsfaktorer	42
9.3 CBR-metoden	45
10 Dimensionering og optimering ved simulering	46

Afslutning	48
11 Diskussion	49
11.1 Beton, et muligt alternativ	49
11.2 Inddragelse af udenlandske erfaringer	50
11.3 Videreudvikling af de teoretiske modeller	50
12 Konklusion	51
12.1 Opbygningen af belægninger	51
12.2 Funktionskrav til belægninger	51
12.3 Dimensionering af belægninger	52
13 Perspektivering	54
14 Litteraturliste	55

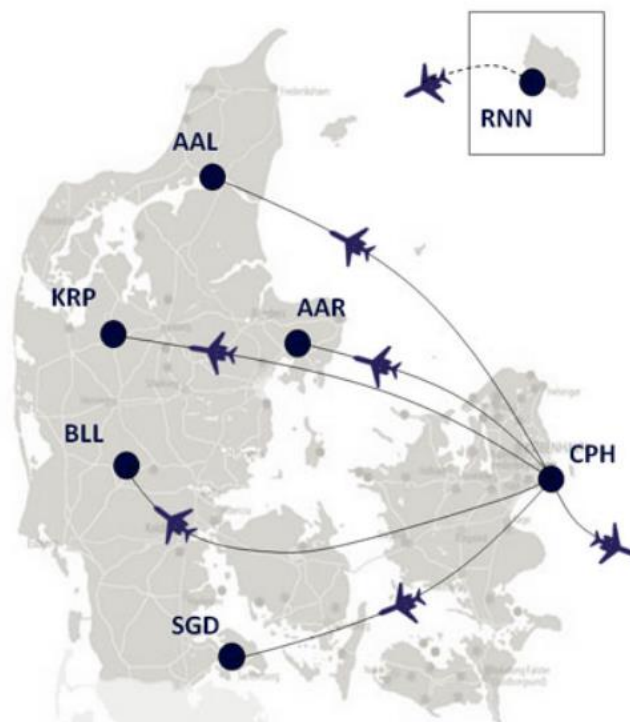
Introduktion



1 Indledning

Infrastrukturen har en stor betydning for økonomisk vækst og stigende globalisering. Uden en velfungerende infrastruktur hæmmes erhvervslivets udvikling, som er afhængig af et virksomt transportsystem. Globaliseringen medvirker til øget handel mellem lande, og en reducere af antallet af produktionssteder, hvilket skaber mere transport (Infrastrukturkommissionen, 2008).

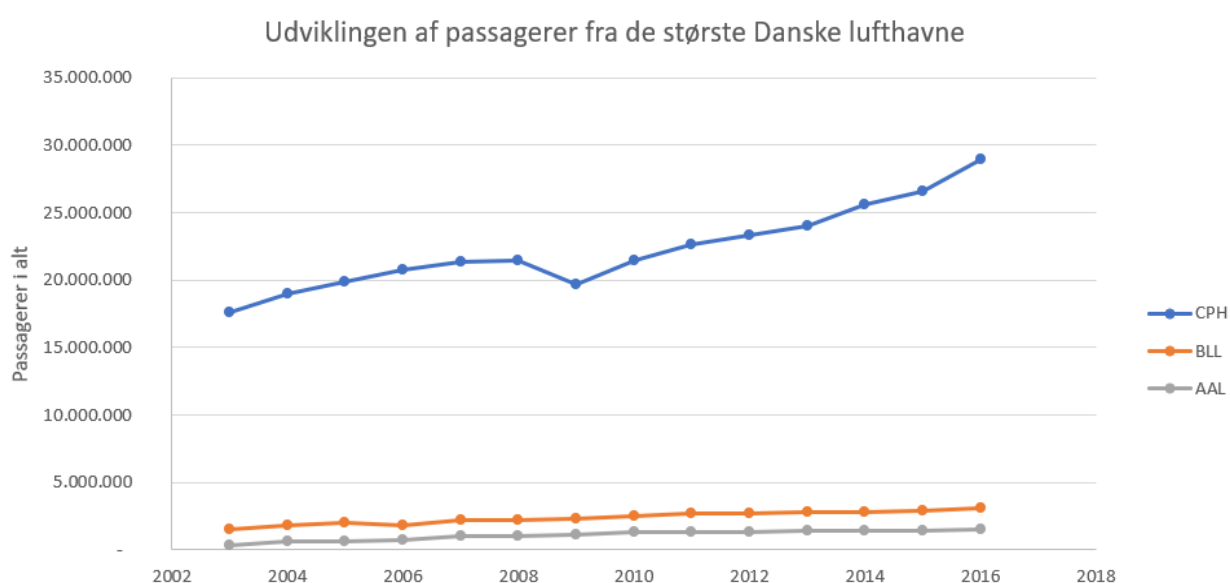
I Danmark fremmer den stigende globalisering de internationale og regionale flyforbindelser, som ligeledes bidrager til økonomisk vækst og jobskabelse i hele landet (Infrastrukturkommissionen, 2008). Den største og mest betydningsfulde danske lufthavn, Københavns Lufthavn, har ruter til landets mellemstore lufthavne. Disse lufthavne og indenrigsruterne fremgår af Figur 1. Københavns Lufthavn er et vigtigt centrum for den internationale trafik til og fra Nordeuropa og Østersøområdet. De danske indenrigsruter giver de rejsende fra provinsen forbindelser til København og fungerer bl.a., som føderuter til udenrigsruterne.



Figur 1: De største danske lufthavne samt indenrigsruterne i Danmark (Københavns Lufthavn, 2017).

Ved valg af transportform er det, at kunne transportere sig hurtigt og effektivt mellem punkt A og B en vigtig faktor, hvad enten det gælder godstransport eller persontransport. Her er flyforbindelser at foretrække over lange afstande, mens personbilen dominerer de kortere strækninger. Lastbiler står for langt størstedelen af godstransporten, mens flytrafikken i dag står for en begrænset del af den samlede godstransport. Der er dog en tendens til, at højværdivarer som skal transporteres effektivt og hurtigt videre, i stigende grad transporteres med fly (Infrastrukturkommissionen, 2008). Særligt efter etableringen af Storebæltsbroen, faldt den danske indenrigstrafik for fly markant.

På trods af flytrafikkens andel af godstransport og persontransport ses der fortsat en markant stigning i antallet af flypassagerer verden over. I 2014 estimerede den internationale luftfartsorganisation, IATA, at passagertrafikken i 2034 ville opnå et passagerantal i den internationale luftfart på 7 mia., hvilket svarer til en årlig vækst på 3,8 % i forhold til 2014 (Finans, 2015). De danske lufthavne er ikke en undtagelse med hensyn til vækst, især den internationale trafik. Antallet af rejsende i de danske lufthavne steg i 2016 til næsten 35 mio., hvilket svarer til en stigning på over 8 % i forhold til 2015 (Danmarks Statistik, 2017). Stigningen af flypassagerer ses især i landets største lufthavne som er København, Billund og Aalborg. Disse tre lufthavne transporterede tilsammen ca. 97 % af alle afrejsende passagerer i 2016 fordelt på 84 % fra København, 9 % fra Billund og 4 % fra Aalborg. Set over en periode fra 2003 til 2016 er antallet af flypassagerer fra disse tre lufthavne tilsammen steget med godt 53 % (Danmarks Statistik, 2017).



Figur 2: Passagerer fra de større danske lufthavne 2007-2016 (passagerantal for København, Billund, Aalborg)
(Danmarks Statistik, 2017)

For at kunne fortsætte udviklingen indenfor flytrafikken, er vedligeholdelse og udbygning af lufthavnene og deres befæstede områder et vigtigt initiativ. Flyvemaskiner påvirker befæstelser med store kræfter, som der skal tages nøje højde for ved dimensionering af f.eks. landingsbaner, rullebaner og standpladser.

Hver af de forskellige områder har en særlig funktion grundet stor variation i belastningens type, herunder flyvemaskines hastighed, statiske eller dynamiske last, der medfører at funktionskravene er forskellige fra hinanden. Befæstelsen kan være konstrueret af en bred vifte af materialer og blandinger af grus, sten, bitumen, cement eller forbedrede jordarter. Valget af materiale og lagtykkelser afhænger af en lang række faktorer. Ved vedligeholdelse er det også vigtigt at minimere omfanget og tidsforbruget af arbejdet for at undgå forsinkelser og sikre optimal udnyttelse af de befæstede områder. Materiale valget har også en væsentlig betydning for hastigheden af vedligeholdelsen.

Hvorledes situationen er indenfor befæstelsesopbygning i lufthavne vil undersøges nærmere i denne rapport. Hvortil en række andre landes erfaringer inddrages for at tilegne en overordnet viden om vejbygningsmuligheder og udvælgelseskriterier.

2 Problemformulering

På baggrund af statistikker, som beskrives i indledningen, forventes flytrafikken at stige over de næste mange år i Danmark. Med udgangspunkt i denne præmis vil rapporten undersøge hvorledes befæstelser i lufthavne opbygges, hvilke metoder og teorier der ligger til grund for de dimensioneringsmetoder som anvendes. Der ville blive foretaget en undersøgelse af de forskellige vejbelægninger, for at afdække hvilke materialer der anvendes samt deres fordele, ulemper, produktion og krav.

"Hvilke forskellige belægningstyper opbygges vejbefæstelser i lufthavne af, og herunder hvilke funktionskrav stilles der til belægningen, samt hvilke teorier ligger til grund for dimensioneringsmetoderne?"

2.1 Afgrænsning

Der foretages en afgrænsning af problemstillingen, idet projektet ellers vil blive for omfattende ved at skulle redegøre og analysere for alle faktorer og løsningsmetoder. I rapporten arbejdes der med tre overordnede kapitler, hhv. en erfaringsopsamling, en teknisk analyse og en teoretisk analyse. Erfaringsopsamlingen afgrænses til at omhandle beskrivelser af de grundlæggende elementer, samt udførelsesprocesserne ved udlægning af fleksible, stive, halvstive og semifleksible belægninger. Den tekniske analyse går i dybden med de omtalte belægninger samt de generelle funktionskrav, der hører sig til befæstelserne i lufthavne. Den teoretiske analyse omhandler baggrunden for teorien som dimensioneringsmetoderne bygger på. Efterfølgende vil resultater og vurderinger blive diskuteret, og der konkluderes på den påviste viden.

De tydeligste forskelle forekommer ved de stive kontra fleksible belægninger, hvorfor disse to primært vil danne grundlag for analysen som undersøger forskellen.

Der ses primært på den øverste del af vejbelægning (de bundne lag), og ikke hele vejbefæstelsen. Dvs. at de ubundne lag, som bundsikring og stabilgrus kun behandles i mindre omfang. Årsagen til denne afgrænsning er, at der for de bundne lag, herunder slidlaget, forekommer flest krav. Endvidere vil en sammenligning af de ubundne lag ikke kunne udarbejdes, idet der indgår et bundsikringslag og/eller et stabilt gruslag i alle fire forskellige belægninger, som alle vil have samme egenskaber og funktioner.

Der ses kun på de befæstede områder: Start- og landingsbaner, standpladser og rulleveje. Ved at udvælge disse områder udgår de resterende, idet de vurderes til ikke at blive udsat for større laster end disse.

Der tages udgangspunkt i den danske anvendelse af belægningstyper, dog inddrages i mindre grad metoder og erfaringer fra andre vestlige lande. Hvis der i rapporten skulle inddrages yderligere erfaringer fra udlandet, ville der forekomme flere faktorer som spiller ind på valget af belægning, herunder temperaturforhold, og det faktum at graden af ønskede kvalitet og udlægningsmetoder varierer fra land til land.

Rapporten har ikke til formål at give instrukser i hvorledes de befæstede områder designes. Men i stedet leder rapporten op til nogle argumenter for og imod forskellige belægningstyper.

Der redegøres kun i mindre omfang for de flytekniske aspekter, som kunne vedrøre flyets bremsesystem, dæk, vægt osv. På baggrund af dette vil fokus ligge på belægningernes egenskaber.

Økonomiske overvejelser foretages kun i mindre omfang. Dvs. der ikke udarbejdes nogen økonomisk analyse.

3 Metode

Dette projekt er et litteraturstudie, som derved har til formål at finde og gennemgå den litteratur, dansk såvel som engelsk, der er om emnet. Projektet har dermed ikke til formål at komme med ny viden på området, men i stedet at videreføre viden fra litteratur for at kunne komme med en vurdering af hvorfor de danske og udenlandske lufthavnsbefæstelser er opbygget, som de er. For at løse opgaven er der foretaget en eksplorativ undersøgelse, da forfatteren ved projektets begyndelse kun havde mindre baggrundsviden og erfaring med emnet gennem diplompraktik.

Projektfasen startede med gennemlæsning af overordnede litteratur fra internettet og bøger. Litteraturen er primært hentet igennem Aalborg Bibliotekerne, men en del kilder stammer også fra databaser, som er tilgængelige via Aalborg Universitetsbibliotek. For bestilling af trykt og elektronisk materiale er der anvendt bestemte kriterier som dokumenttype, udgivelses år og sprog. Der er benyttet en række forskellige søgeord som asfalt, beton, belægning, vejbygning, design, dimensionering, lufthavn og landingsbane, på dansk såvel som engelsk. Efterfølgende er søgeresultaterne sorteret efter overskrifter og derefter udvalgt på baggrund af abstrakt, for til sidst at nærlæse enkelte relevante afsnit. En del af billederne og forståelsen er fra praktikopholdet, hvor der har været renoveringsprojekter af lufthavnsbelægninger på Flyvestation Aalborg og på Thule Air Base i Grønland.

Entreprenørvirksomheden Munck Asfalt har også aktivt bidraget med materiale om befæstelsesopbygning og udbudsmateriale, som er benyttet i rapporten til at vurderinger af danske belægninger.

Erfaringsopsamling



4 Vejbefæstelser i lufthavne

Erfaringsopsamlingen vil i første del beskæftige sig med udviklingen af lufthavns befæstelser gennem tiden. Opbygningen af de første landingsbaner var meget primitive. Oftest bestod de blot af en græsmark, hvilket også var tilstrækkeligt, så længe flyene forsat var meget lette. Men under 1. verdenskrig, hvor militærfly blev taget i brug, begyndte udviklingen for alvor at gå hurtig. Med øgede investeringer i forskning og udvikling af flyvemaskiner blev flyene større og tungere og krævede derfor forstærkede landingsbaner, ofte i form af komprimeret grus. Efter 1. verdenskrig i 1919 åbnede bl.a. flyruter mellem Paris og London, hvorefter der først i takt med 2. verdenskrig, yderligere blev gjort store fremskridt med udviklingen af flyvemaskinerne. De nye flyvemaskiner var markant større og tungere og krævede derfor belagte landingsbaner (Kazda & Caves, 2015).

Den første danske belægning af en landingsbane blev anlagt i 1941 i Københavns Lufthavn, efter at flyene i tørtidsperioder kørte fast på lufthavnens græslandingsbaner (Københavns Lufthavn, 2017). Landingsbanen blev belagt af en 1400 meter lang betonbane, hvor der i de efterfølgende år yderligere blev anlagt tre landingsbaner og dertilhørende rulleveje i betonbelægninger.

I takt med at jetflyene blev udviklet, og taget i brug verden over, blev der sat gang i store udbygningsprogrammer, som medførte at landingsbaner blev gjort længere og forsynet med avanceret teknisk udstyr. Med viden om og erfaringer med den tunge trafik fra vejene blev der udviklet nye belægningstyper og principper for vejopbygning. Opbygningen af vejbefæstelser har dermed ændret sig i takt med trafikbelastningen og øvrige påvirkninger. Inden for de seneste år er der også sket en udvikling med øgede trafikbelastninger, som har spillet en stor faktor, med hensyn til nyudviklede materialer og udførelsesmetoder. Nye bærelagsmaterialer i form af stabilt grus, bitumenbundne bærelagsmaterialer vandt efterhånden indpas som den foretrukne danske belægningsvalg for veje såvel som befæstelser i lufthavne (Thagesen, 2000).

4.1 Princippet af opbygninger af vejbefæstelser

Indledningsvist præsenteres de almindelige beskrivelser, som anvendes inden for større vejopbygninger. De grundlæggende principper og metoder inden for vejopbygningen af almindelige vejbefæstelser, anvendes også til vejbefæstelser i lufthavne. Den primære forskel i opbygningen er generelt at der anvendes større lagtykkelser i lufthavne, samt at visse typer belægninger ikke bør anvendes, b.la. grundet manglende bæreevne. Lufthavnsbefæstelser er designet og konstrueret til at yde en tilstrækkelig styrke til at modstå store laster fra fly og til at skabe en fast, stabil, jævn og skridsikker overflade året rundt, i alt slags vejr.

Vejbefæstelsens funktion er at optage belastningen, som forekommer ved trafik, for derved at fordele belastningen til den underliggende jord, hvorpå vejbefæstelsen hviler. Vejbefæstelser opbygges som et lagdelt system af vejmaterialer, der er udlagt på vejens underbund. De forskellige lag i vejbefæstelsen har til dels hver deres egenskaber og deraf funktion. Den lagvise opbygning er noget centralt ved en vejbefæstelse. Det vil være uøkonomisk at opbygge en befæstelse af ét og samme materiale i hele befæstelsens tykkelse, idet de trykspændinger, der forekommer af trafikken, aftager nedefter i befæstelsen. Derfor er det fordelagtigt, at benytte materialer med en kvalitet og pris, der aftager i takt med dybden fra øverste lag. Samtidig har en lagdelt opbygning både økonomiske og konstruktive fordele ved, at de enkelte lag kan have forskellige primære funktioner. Grundlæggende opbygges vejbefæstelsen af et slidlag, et bærelag og et bundsikringslag (Busch & Bolet, 2016).

4.1.1 Slidlag

Vejoverfladen består af et slidlag, hvis formål er at sikre gode overfladeegenskaber, såsom jævn overflade, forsegling af vejbelægningen, samt tilstrækkelig friktion mellem dæk og vej. Slidlaget indeholder en større andel af finere fraktioner af høj kvalitet, end i de underliggende lag, og er samtidig ofte det dyreste lag (Asfaltindustrien, 2016). Der findes et utal af forskellige slidlag, som har forskellige primære funktionsegenskaber. Derfor består valget af slidlag af en række overvejelser, således slidlaget bedst muligt tilgodeser de ønskede funktionsegenskaber på den pågældende belægning. I nogle tilfælde ønskes hurtig dræning af overfladevand, mens der i andre tilfælde foretrækkes at være ugennemtrængelig, for at holde vand ude.

4.1.2 Bærelag

Bærelagets hovedfunktion er at sikre en god trykfordelingsevne og stabilitet, således der ikke opstår spændinger som kan føre til deformationer i vejbefæstelsen. Bærelaget består ofte af to forskellige lag, hhv. et ubundet og bundet materiale, som alt efter belægningstype er af forskellige materialer. Det nederste bærelag, det ubundne bærelag, består oftest af stabilt grus. For at sikre en vis trykfordelingsevne og stabilitet stilles der krav til materialernes kornfordelingskurver. Graderet materialer har en større lejringstæthed og dermed bedre styrke- og deformationsegenskaber end enskornet materialer (NCC, 2001).

4.1.3 Bundsikringslag

Bundsikringslaget er det nederste lag i den egentlige vejbefæstelse. Bundsikringslaget skal udfylde én eller flere af følgende primære funktioner afhængig af bl.a. klima og jordbundens art. Med risiko for at vand kan trænge ind i befæstelsen, skal bundsikringslaget sikre at vandet ledes ud til et afvandingssystem, og at der ikke kan trænge vand op i vejbelægningen.

I områder med kolde vintre og frostfarlig underbund medvirker bundsikringslaget til at begrænse frost- og tøbrudsskader ved at øge afstanden til frostfarlig underbund. Bundsikringslaget skal fungere som en fortsættelse af de overliggende bærelag og derved viderefordre belastninger fra bærelaget til underbunden. Bundsikringslaget opbygges almindeligvis af sand eller grus.

4.1.4 Underbygning

Vejbefæstelsen opbygges ovenpå råjordsplanum, som skal have en tilstrækkelig bærende styrke for at kunne understøtte belastningen overført fra vejbefæstelsen. Underlagets bærestyrke har stor indflydelse på valg af type af belægningen. Ved jordarter med høj bærestyrke kan den resterende vejbefæstelse konstrueres tyndere og billigere. For at kunne vurdere en jords egnethed til brug for vejbygning er det nødvendigt at have kendskab til de forskellige jordarters egenskaber. Disse egenskaber er i høj grad afhængig af kornstørrelsen, derfor er kornfordelingen af jorden af afgørende betydning for jordbundarters opdeling og dermed er styrkeegenskaber afhængig af densitet, hulrum og vandindhold i jorden.

De jordarter, som er ringest egnede til fundering, er opblødte ler og siltholdige glaciale eller senglaciale aflejringer. Det som kendetegner disse jordarter er deres ofte høje vandindhold og

andel af små kornstørrelser, hvor der ved ler og silt er tale om fraktioner mindre end 0,06 mm. Mere velegnede jordarter er de hvor grusfraktioner og sandfraktioner indgår som størstedelen af vægten, eller som er usorterede og forkonsoliderede. Dette sikre gode styrke- og deformationsegenskaber (NCC, 2001). For at kunne afgøre jordarten foretages geotekniske undersøgelser, som ikke omtales yderligere i denne rapport.

5 Belægningstyper

Belægninger omtalt i rapporten inkluderer grundlæggende de fleksible og stive, hvoraf forskellige kombinationer af de to også indgår i rapportens indhold, herunder semifleksible og halvstive belægninger. Betegnelserne fleksible og stive belægninger beskriver to forskellige måder hvorledes belægningstyperne reagerer på overfladebelastninger.

5.1 Fleksible belægninger

Fleksible belægninger består af et lagdelt system, som stiger i styrke mod overfladen. En fleksibel belægning giver sig elastisk under en overfladebelastning. De fleksible belægninger kendes i form af asfaltbelægninger, som er en blanding af de tre elementer; stenmaterialer, bitumen og filler. Fordelingen af bestanddelene varierer alt efter asfalttype, men som udgangspunkt udgør stenmaterialer normalt ca. 90 % af den samlede vægt, filler udgør ca. 5 % og bitumen udgør ligeledes ca. 5 %.



Figur 3: Landingsbane i asfalt på Flyvestation Aalborg.

Stenmaterialerne, som udgør langt størstedelen af asfaltens samlede vægt, består af knuste og uknuste sten i forskellige størrelser. De danske stenmaterialer stammer hovedsageligt fra grusgrave og søpladser. Derudover indkøbes granit fra bl.a. Norge og Sverige, idet granit har en større styrke og mere ensartet kornform end de danske materialer (Thagesen, 2000).

Stenmaterialerne skal helst pakke sig, så mindre korn udfylder hulrummene mellem de store korn, og således at hulrummene mellem de mindre fyldes af endnu mindre korn. Herved opnås, den effekt, at kornene bedst muligt overfører belastningen mellem sig. Dette hensyn sikres ved at kræve, at materialernes kornkurve er passende graderet. Alt efter typen af den fleksible belægning anvendes forskellige betegnelser givet ud fra maksimum kornstørrelse som i danske belægninger opdeles i 8 mm, 11 mm, 16 mm eller 20 mm.

Filler, som er et finkornet formalingsprodukt, anvendes til at udfylde de mindste hulrum i asfalten. Ved at tilsætte filler forøges viskositeten, og der dannes bitumenmørtel, som virker stabiliserende. Desuden kan additiver tilsættes som forbedre asfaltens forskellige egenskaber.

For at binde stenmaterialerne til en sammenhængende blanding anvendes bitumen. Bitumen, der består af højmolekylære kulbrinter, asfaltharpikser og asfaltolier, produceres ved destillation af råolie. En nærmere gennemgang af bitumen fremgår af afsnit 5.1.1.

5.1.1 Bituminøse bindemidler

Bitumen forekommer i naturen som Trinidadasfalt, dog er den bitumen som anvendes hovedsageligt fremstillet ud fra råolie (NCC, 2001). Med tiden og under diverse påvirkninger som belastning, sol og temperatur vil der ske en nedbrydning og omlejring af partiklerne i bitumen, hvorved materialeegenskaberne ændres. Disse nedbrydninger sætter en grænse for bitumens levetid, idet den med tiden vil miste noget af sin klæbeevne og blive mere stiv og sprød (NCC, 2001). Alt efter anvendelse skal bitumen afpasses efter den ønskede belægningstype, trafik og klima i området. Bitumens reologiske egenskaber udtrykkes i praksis ved empiriske målemetoder som penetration, blødhedspunkt og viskositet. Bitumen inddeles og navngives normalt efter penetration, som angiver dens hårdhed. Desto højere penetration desto blødere bitumen.

Blødhedspunktet, bestemmes ud fra kugle- og ringmetoden, og udtrykker hvor let bitumen deformerer ved høje temperaturer, som især forekommer ved direkte sol om sommeren (NCC, 2001). Ved et lavt blødhedspunkt kan der opstå sporkøring og andre ujævnheder, hvorfor det er vigtigt at blødhedspunktet er afpasset til netop det klima og deraf det temperaturinterval, der kan optræde. Der forekommer ligeledes andre empiriske målemetoder som viskositet, brudpunkt og duktilitet. De nærmere beskrivelser for udførelsen findes i form af danske standarder og europæiske normer (Thøgersen, 2013).

Bitumen skal ved opvarmning kunne gøres tilstrækkelig flydende, for at den kan anvendes til omhylning af stenmaterialer. Dog skal belægningen ved høje temperaturer have en passende viskositet, således den ikke deformeres under belastning. Samtidig skal bitumen ved lave temperaturer være elastisk og fleksibel, således der ikke opstår revner ved at klæbelaget brister. For at kunne arbejde med bitumen skal viskositeten nedbringes, hvorved bitumen bringes på flydende form ved opvarmning, opløsning i et opløsningsmiddel eller ved emulgering i vand (Korsgaard, 2011)

5.1.2 Bitumen Modificeret/Ikke modificeret

Fra begyndelsen af 80'erne og til i dag anvendes modificeret bitumen oftere og oftere til forbedring af de traditionelle egenskaber (Asfaltindustrien, 2016). Modificering af bitumen muliggør eksempelvis forbedret styrke, kohæsion eller mindsket temperaturfølsomhed. En anvendt modificering til lufthavnsbyggeri er asfaltener, som nedsætter temperaturafhængigheden, forøger stivhed og viskositet og deraf opnås en forbedret bæreevne (NCC, 2001). Eksempler på forskellige modificerede tilslag fremgår af Figur 4.

Type	Virkemåde på bindemidlet	Betegnelse
Gummi	Nedsat temperaturafhængighed Forøgede elastiske egenskaber Forbedrede kuldeegenskaber Forbedret klæbeevne	Naturgummi SBR (styren-butaden) gummi SBS (styren-butaden-styren) block polymer Dæk granulat
Plastik	Nedsat temperaturafhængighed Forbedret bæreevne	Polyethylen Polypropylen EVA (ethyl-vinyl-octat)
Oxydations-katalysatorer	Nedsat temperaturafhængighed Forbedret bæreevne Risiko for accelererende ældningsprocesser	Mangan-salte
Asfaltener	Nedsat temperaturafhængighed Forøget stivhed og viskositet Forbedret bæreevne	Naturasfalt Gilsonit Carbon black
Olier	Blødgøring af hård bitumen Rejuvenering af asfaltgenbrug	Rejuvenator
Klæbeforbedrere	Styrker bindingskraft til mineraler	Aminer Kalkhydrat
Antioxidanter	Forsinker naturlige ældningsprocesser	Bly-forbindelser Carbon Calcium-salte
Fibre	Binder bitumen og muliggør højt bindemiddelinhold i asfaltbelægning	Cellulose Stenuld Glasfibre Polyester

Figur 4: Oversigt over modificerende tilslag (NCC, 2001).

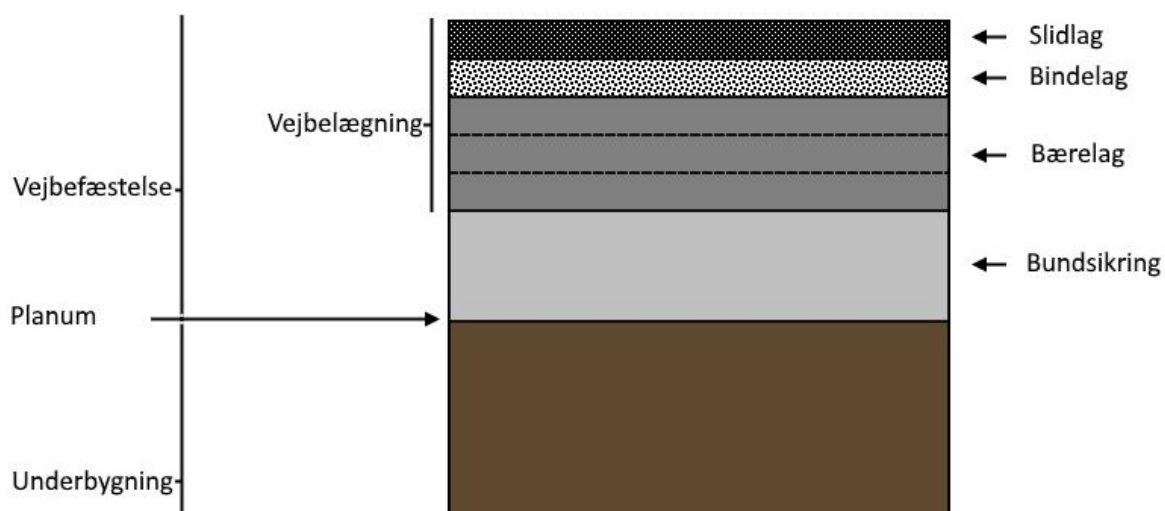
5.1.3 Bitumenopløsning (Cutback-bitumen) og emulsioner

Cutback-bitumen anvendes ved brug af opløsningsmiddel i form af olieprodukter (f.eks. terpentin), som blødgør bitumen. Efter opvarmning kan emulsionen udsprøjtes, herefter vil opløsningsmidlet fordampe og efterlade en hinde af bitumen. Fordelen ved brug af opløsningsmiddel er prisen, dog ses der samtidig en stor ulempe i form af netop udledningen af opløsningsmiddel, som kan være sundhedsskadeligt for de som arbejder med produktet og forårsage luftforurening (Korsgaard, 2011).

Ved i stedet at anvende emulsionsteknikken, til en lidt højere pris, undgås helbredsrisikoen. Ved bitumenemulsion opslæmmes bitumenpartikler i vand, ved brug af emulgatorer og dermed nedsættes overfladespændingen mellem bitumen og vandet, således de to væsker blandes. Ved udsprøjtning vil emulsionen bryde og vandet fordampe, hvorved bitumendråber atter klumper sammen igen. Denne metode gør det muligt at håndtere og udsprøjte selv ved lave temperaturer (0 – 5 °C). Selve bitumen udgør mellem 55 og 70 % af emulsion (Korsgaard, 2011).

5.1.4 Asfaltbelægninger

I Danmark anvendes en lang række forskellige typer asfaltbelægninger til både slidlag og bærelag, hvor nogle af de mest anvendte fremgår af næste side. Det bituminøse slidlag består af en blanding af forskellige udvalgte aggregater bundet sammen med bitumen. De tætte asfaltbelægningerne forhindrer indtrængen af overfladevand til de nedre lag, samtidig giver de en jævn, som er fri for løse partikler i overfladen. Hvor der forekommer store laster anvendes ofte et bindelag til at binde bærelag og slidlag sammen. Bindelaget udføres som et understøttende asfaltlag indeholdende grove grus fraktioner, som tager del i trykfordelingen af belastningen. Princippet for en fleksibel belægning fremgår af Figur 5.



Figur 5: Princippet ved fleksible belægning.

Slidlagstyper:

- Overfladebehandling (OB)
- Tyndlagsbelægninger (TBK)
- Koldasfalt (KA)
- Pulverasfalt (PA)
- Asfaltbeton (AB)
- Skærvemastiks (SMA)

Bindelag:

- GAB 0 (GAB 0)
- Asfaltbetonbindelag (ABB)

Bærelagstyper:

- Grusasfaltbeton 0/I/II (GAB 0/I/II)
- Sandasfaltbeton (SAAB)
- Skærvemacadam (SKM)
- Singelmacadam (SIM)
- Stabilgrus I/II (GS I/II)

5.1.5 Produktion og kontrol af asfaltmateriale

Selve asfalten fremstilles i et asfaltblande anlæg, hvor stenmaterialerne i ønskede størrelser, alt efter recept, tørres og opvarmes, hvorefter de blandes med den nødvendige mængde filler og opvarmede bitumen. Normalt fremstilles asfalten ved en temperatur mellem 150 og 180°C, der kendes som Hot Mix Asfalt. Dog forekommer andre alternativer ved lavere temperaturer, som Warm Mix Asfalt og Kold Blandet Asfalt. Warm Mix Asfalt produceres ved en temperatur omkring 20 - 40°C lavere end en tilsvarende Hot Mix Asphalt (Asfaltindustrien, 2016). På denne måde reduceres CO₂-udledningen, idet der anvendes mindre energi til opvarmning. Kolde blandinger fremstilles uden opvarmning af stenmaterialer. Dette kan lade sig gøre ved brug af en specifik bitumenemulsion, som bryder enten under komprimering eller under blanding. Efter brydning dækker emulsionen aggregatet, og over tid øges dets styrke.

I henhold til produktstandarder stilles der krav til dokumentation af den producerede asfalt. Dette gøres ved at præcisere indholdet af stenmaterialer, hulrum, og bitumen i asfalten og at der efter udlægning skal foretage tests af borekerner, som skal påvise indholdet (Thagesen, 2000). Asfalt har en vis elasticitet, udtrykt ved elasticitetsmodulet, E-modulet eller blot E-værdi, E [MPa], og når asfalten påføres en belastning, vil den deformere. Vejmaterialers bæreevne kan evalueres ud fra E-værdien, der er et udtryk for et materiales stivhed. E-værdien angiver forholdet mellem spændingerne, σ [MPa], og tøjninger, ϵ [-] Hvor en høj E-værdi er ensbetydende med en større bæreevne (Busch & Bolet, 2016).

De mange forskellige asfalttyper, har hver især deres individuelle bæreevne. Endvidere gælder det også, at jo tykkere laget udlægges, desto større bæreevne opnår laget. Den omtrentlige bæreevne for asfaltbelægninger vurderes ud fra deres E-værdi, hvor slidlaget og bærelaget ligger på hhv. 3.000 MPa og 5.000 MPa.

5.1.6 Genbrug af asfaltbelægninger

Erfaringer har vist, at et slidlag gennemsnitlig skal udskiftes hver 12. år (Thagesen, 2000). Nedbrydningen af asfalten, er afhængig af en række faktorer, såsom tid, kemikalier, temperatur, slid og belastninger. Når et nyt slidlag er udlagt, vil opbygningen atter anses som nyanlagt, kun som følge af bæreevne problemer vil en udskiftning af bærelagene ikke være nødvendigt.

Asfaltbelægninger er bæredygtige fordi de i princippet kan genanvendes 100 % (Asfaltindustrien, 2016). Ved at genbruge materialerne i asfaltbelægninger kan der opnås betydelige besparelser, da indkøb og transport af nye råmaterialer, samt forarbejdning af disse mindskes.

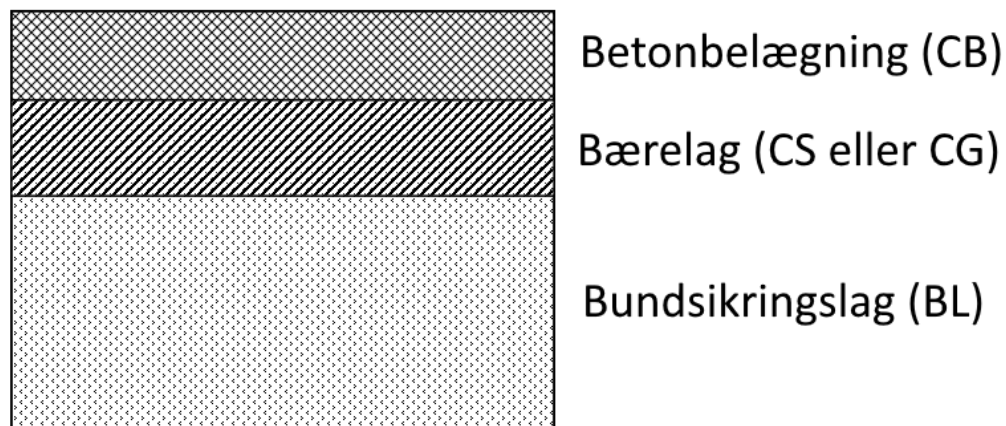
Genanvendelsen forekommer ved flere metoder. Gamle asfaltbelægninger kan med remixmetoden affræses og blandes i ny varmblandet asfalt direkte på vejen eller transporteres til en asfaltfabrik, hvor det sorteres og løbende kan tilsættes som genbrug til nye blandinger. Alternativt kan asfalten knuses og anvendes som ubundet bærelag. Dog anvendes alene stenmaterialerne ved denne metode, og den ellers dyre bitumen går til spilde.

5.2 Stive belægninger

Det primære element i stive belægning er de cementbundne materialer. I modsætning til de fleksible asfaltbelægninger vil stive belægninger have en tendens til at revne, som følge af svind og temperaturbevægelse.

Betonbelægninger opbygges ofte som et 3-lags system, jf. Figur 6, hvor det nederste lag består af bundsikring, derefter et cementbundet bærelag og øverst betonbelægningen, der virker både som bære- og slidlag. Bærelag omfatter nedenstående typer.

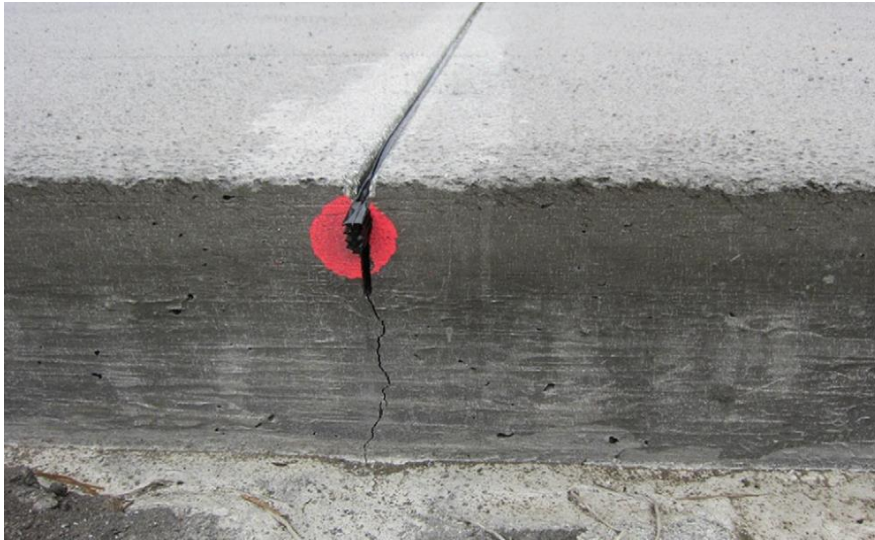
- Cementbeton (CB)
- Cementbundet grus (CG)
- Cementbundet sand (CS)



Figur 6: Princippet ved betonbelægning.

Betonbelægninger kan overordnet inddeles i to typer, hhv. uarmeret beton med fuger eller kontinuert armerede beton (Thøgersen, 2013). Forskellen på de to metoder er måden, hvorpå belægningen modstår de brud, der sker i beton ved hærdning. Den mest udbredte type er de uarmeret belægninger med fuger. Denne type er førhen blevet anvendt på motorveje i Danmark (Thøgersen, 2013).

Brud og revner i betonbelægninger kan forekomme ved temperatursvingninger. For at forhindre revner i betonbelægningen etableres en række tværfuger i den færdigstøbte beton, som dermed sikre kontrollerede brud, ved at det skal være muligt for betonen at give sig ved temperatursvingninger (Kazda & Caves, 2015).



Figur 7: Tværfuge i betonbelægning (Kazda & Caves, 2015).

Ved udlægning af kontinuert armerede betonveje, dvs. uden fuger. Anvendes der et net af armering i betonbelægningen, som skal sammenholde betonvejen og modstå sammentrækninger og udvidelser (Kazda & Caves, 2015). Som renoveringsmetode kan betonbelægninger også udføres ved brug af præfabrikerede betonplader for minimal påvirkning af den daglige trafik.

Den sidste periode med beton anvendt til vejbygning i Danmark var mellem år 1967-1969 (Thøgersen, 2013). I perioden etablerede man flere motorvejsstrækninger, dog af meget varierende kvalitet. Det har givet anledning til betonveje med kort levetid, som har medført, at beton ikke længere anses som et muligt dansk belægningsalternativ til almindelige veje og deraf er den danske udvikling gået i stå.

Modsat har udlandet løbende gjort stor brug af betonbelægninger til vejbygning, hvor man i dag udlægger moderne betonveje med en slipform paver. Med særlige slippavere kan der udlægges i to lag, således vejen opbygges med et tyndt øvre lag, bestående af optimerede slidlagsmaterialer. Det nederste betonlag laves med grovere materialer, hvorved der kan anvendes genbrugsmaterialer i form af knust beton. Efter udlægning afdækkes den med plast for at hærde, hvorefter der kan skæres langs- og tværgående fuger, som efterfølgende forsynes med fugebånd for at hindre nedtrængning af vand.



Figur 8: Etablering af præfabrikerede betonplader i Københavns Lufthavn (Saleem & Westergaard, 2012).

Stive belægninger optager laster og fordeler dem ved bøjning. Bærelag af cementbundne materialer har gode egenskaber i forhold til at fordele belastningen og er derfor særlig anvendelige ved tung trafik, eller hvor underbunden har ringe bæreevne.

Bærevnen for betonbelægninger og dermed holdbarheden, har en E-værdien på ca. 35.000 MPa (Delatte, 2014). E-værdien for beton afhænger af betonsammensætningen, især v/c-tallet samt mængden og typen af tilslag. E-værdien vil, som ved asfalt, kunne variere alt efter blandingsforhold og tilslag. Betons høje E-værdi giver en god indikation af dens styrke og stivhed i forhold asfalt.

5.2.1 Produktion og kontrol af beton- og cementmaterialer

Cementbundne vejbygningsmaterialer, herunder cementbeton og cementbundne bærelag, fremstilles ved sammenblanding af cement, vand og grusmaterialer, samt eventuelle tilsætningsstoffer. Ud fra den færdigblandet beton er fordelingen omkring 14 % cement og 7 % vand og de resterende 79 % består af grus og sand. Under hærkning vil blandingen af cement og vand danne en hård masse, som binder materialerne sammen (NCC, 2001).

Cement fremstilles ved formaling af cementklinker, en mindre mængde gips samt små mængder af uorganiske materialer. Cementklinkerne, som hovedsageligt består af calciumsilikater, fremstilles ved brænding af en blanding bestående af kalk og ler eller kalk og sand. En af de mest kendte typer cement er portlandcement, som fremstilles efter to forskellige metoder hhv. vådmetoden og tørmetoden. Ved vådmetoden blandes og formales råmaterialerne opslemmet i vand, så den færdige råblanding fremkommer som en slam (NCC, 2001).

Ved tørmetoden foretages en udtørring af råmaterialerne, samtidig med at de blandes og formales. Portlandcement reagerer med vand under dannelse af bl.a. forskellige calciumsilika-hydrater, som sikrer de væsentligste styrkeegenskaber i hærdnet beton (NCC, 2001).

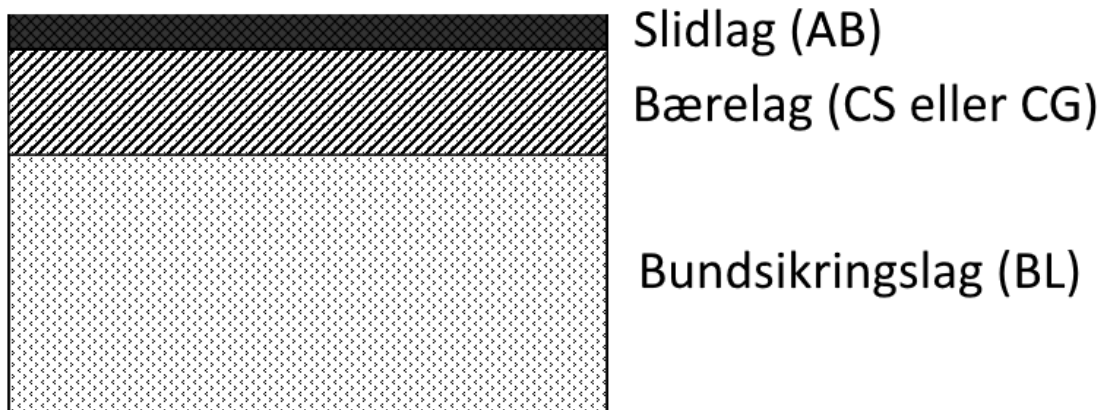
Til fremstilling af beton anvendes rent vand, eksempelvis vandværksvand, idet urenheder i vandet kan mindske betonens styrke og holdbarhed. Vand og cementforhold har stor betydning for styrken, som bestemmes ud fra vægtforholdet mellem vand og cement. Hvis der blandes mere vand i betonen, bliver betonens styrke mindre (NCC, 2001).

Gruset som anvendes udgør størstedelen af den samlede vægt i beton. Det skal være frit for organiske bestanddele og lerpartikler i en sådan grad, at det ikke får indvirkning på den færdige betons styrke. Som danske stenmaterialer anvendes granitskærver for at minimere risikoen for alkalikiselreaktioner, som kan medføre revner, hvis vejsalt reagerer med cement (NCC, 2001). Ved at tilføje tilsætningsstoffer til betonmørtel, kan der opnås en forbedret virkning på materialeegenskaberne, som kan virke ved reducere hærdetiden eller at mindre vand er nødvendigt. For at tage hensyn til perioder med frost og deraf betonens frostbestandighed anvendes luftindblandingsmidler. Disse sikre at betonens luftporestruktur har hulrum, der virker som ekspansionsbeholdere, som aflaster trykket, når vand i betonen fryser (NCC, 2001).

5.3 Halvstive belægninger

Disse belægninger består af et bærelag bestående af et cemenbundet materiale, som er dækket af et fleksibelt bituminøst overfladelag. Disse belægninger giver en kombination af høj styrke og god holdbarhed, samtidig med at revnedannelse kan undgås.

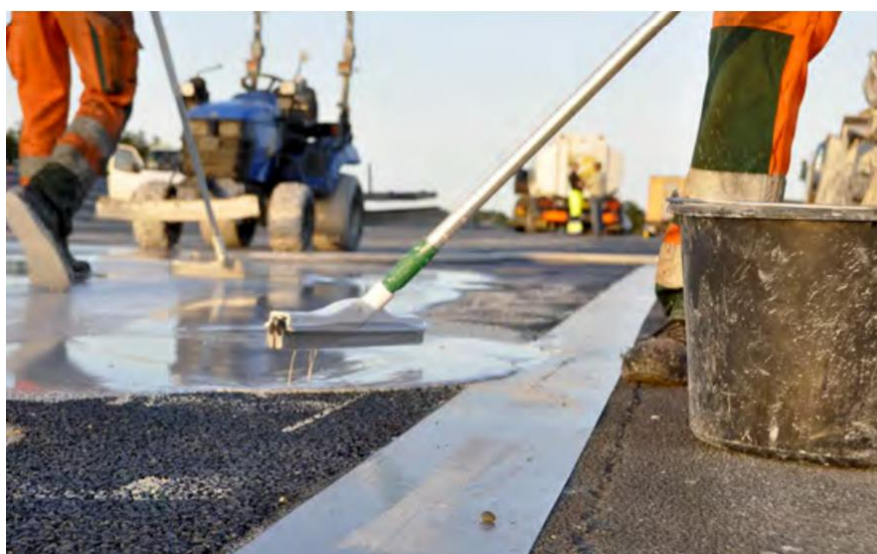
Design af materialemix for halvstive belægninger er i høj grad afhængig af erfaringer, hvilke har været meget varierende i praksis (NCC, 2001). Nogle halvstive belægninger har givet fremragende støtte til overfladelag i mange år, mens andre har haft behov for total reetablering efter få år. Derigennem har brugen af de halvstive belægninger i Danmark været meget begrænset siden starten af 80'erne, særligt som følge af store problemer med revnegennemslag på visse vejstrækninger (Thøgersen et. al. , 2004). Det grundlæggende problem med denne belægningstype er de tværrevner, der opstår pga. temperaturbetinget kontraktion af det cemenbundne lag. Disse revner kan reflektere op igennem den overliggende asfalt og viser sig på overfladen som kraftige tværrevner med en indbyrdes afstand på 10 - 20 m.



Figur 9: Princippet ved halvstivbelægning.

5.4 Semifleksible belægninger

Semifleksible belægninger er en kombination af asfalt og beton hvilket resulterer i et produkt som har de bedste egenskaber fra begge materialer. Derved opnås en fugefri belægningen med god fleksibilitet, som samtidig har en høj bæreevne og god slidstyrke. Afhængig af hvilket firma, der producerer belægningen, er belægningstypen kendt som blandt andet Densiphalt, Confalt og Flexfalt. Ofte består belægningen af et tre til syv cm lag asfalt med 28 % hulrum. Hvor hulrummene fyldes efter udlægningen med den letflydende højstyrkebeton. Konstruktionen og tykkelsen af de enkelte lag er afhængig af, hvilken belastning belægningen udsættes for.



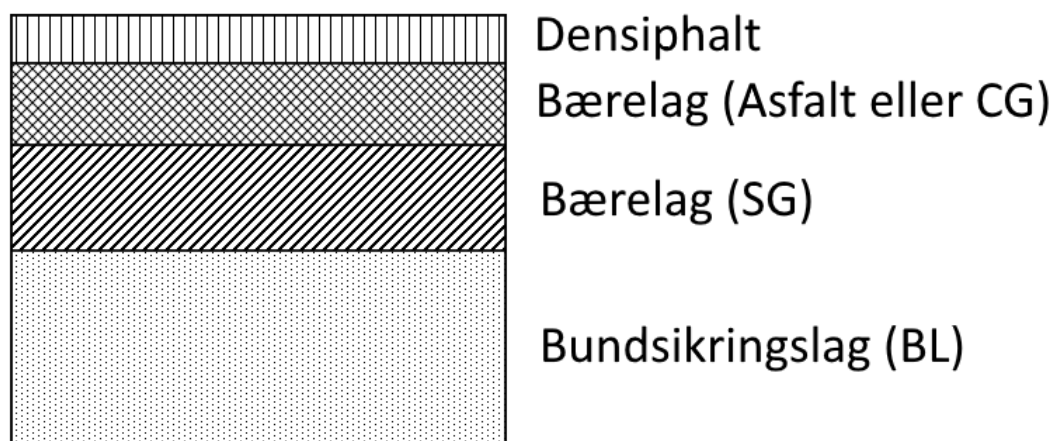
Figur 10: Udlægning af Densiphalt (Borgmann, Hougaard, & Nielsen, 2016).

Semifleksible belægninger gjorde sit indtog i 80'erne, hvor disse bl.a. blev anvendt ved standpladser i Københavns Lufthavn. En af fordelene ved netop denne type belægning er, at den kan modstå en meget stor belastning, uden det giver anledning til sporkøring.

Helt afgørende for kvaliteten af den færdige belægning, er udfyldningsgraden af tilgængelige hulrum. Er hulrummene ikke fuldstændigt udfyldt, vil belægningen have væsentligt nedsat levetid. Hulrummet kan bestemmes dels ved en volumetrisk beregning (pulvertallet) og dels ved kontrol af udtagne borekerner. Ligeledes har det anvendte vand/cement forhold betydning for belægningens holdbarhed.

Belægningen, eksempelvis cornfalt, er ligeledes temperaturstabil fra minus 50°C til plus 90°C. Den er meget bestandig over for frost/tø og tørsalt, og den har en god resistens over for en række kemikalier. Bæreevnen for semifleksible belægninger, og dermed holdbarheden, har en E-værdi på ca. 8.000 MPa (NCC, 2001).

En af årsagerne til, at semifleksible belægninger hovedsageligt er anvendt på mindre afgrænsede arealer, er sandsynligvis prisen og det forhold at udlægningsmetoden, er langsommelig i forhold til asfalt. Det skyldes, at der i første omgang skal udlægges en drænasfalt, og efterfølgende betonmørtel, som har en afbindingstid på 12-18 timer. Derefter skal belægning hærde i flere dage før den kan åbnes for tung kørsel og for at bliver olieresistent (Vejdirektoratet, 2013).



Figur 11: Princippet ved semifleksibelbelægning.

Teknisk analyse



6 Funktionskrav

Afsnittet er opbygget, således at belægningstyperne løbende vil blive vurderet ud fra de opstillede funktionelle krav og materialernes egenskaber. Herefter vil en samlet vurdering af belægningstyperne blive præsenteret. Hvilke krav belægningerne skal kunne efterleve, er udvalgt for at repræsentere de krav der stilles til de funktionelle og strukturelle egenskaber. De udvalgte krav vurderes tilstrækkelige for at danne grundlag for en sammenligning, og give et repræsentativt billede af fordele og ulemper ved de forskellige belægningstyper. Hvormed det ikke er hensigten at finde svaret på den bedste belægning.

Ved hvert befæstede område i lufthavnene skal der tages forskellige beslutninger i forbindelse med valg af belægningstyper. Med henblik på start- og landingsbaner skal der indtænkes god slidstyrke, en overflade som kan lede overfladevand væk, samt en god friktion til bremsning og ikke mindst en jævn overflade for at sikre passagerkomfort og minimal risiko for uheld.

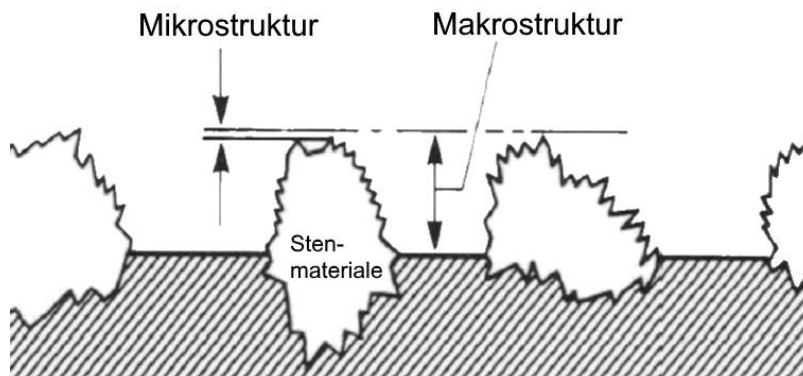
Til standpladser skal der være en god bæreevne og stabilitet, som sikre befæstelsen imod de store belastninger fra flyene, som kan forårsage sætninger. Samtidig skal belægningen være modstandsdygtig mod olie og brændstofudslip. I følgende tages udgangspunkt i de kriterier, der danner grundlag for dimensioneringen af vejbefæstelser. Der vil blive set på hvilke faktorer og krav, der skal tages højde for, i forbindelse med opbygning af vejbefæstelsen. De funktionskrav, der stilles til en vejbefæstelse, opdeles efter friktion, jævnhed, bæreevne og økonomi.

6.1 Friktion

Friktion opstår ved kontakt mellem to legemer, som bevæger sig i forhold til hinanden, som det ses mellem dæk og vejoverflade. Friktion spiller en væsentlig rolle i sikkerheden, da den er med til at sikre tilstrækkelig bremsning. Det gælder særligt i vådt føre, hvor friktionen reduceres væsentligt. En god friktion på landingsbaner sikre at fartøjet kan opretholde styringen og derved undgå skridning, samtidig med at bremselængden mindres. Der er krav til, at belægningen skal sikre en tilstrækkelig friktion, når den er tør og at den i vådt vejr, skal være i stand til at sikre en vis dræning for at undgå aquaplaning. Et udtryk for friktionens størrelse er friktionskoefficienten, som afhænger af vejoverfladen, dækkenes type, hastighed af køretøjet, hjulenes rulning og glidning (Thagesen, 2000).

Vejbelægningens overfladeegenskaber er givet af dets mikrostruktur og makrostruktur. Makrostruktur består af kontakten mellem dækket og belægningens overflade og skal sikre god dræning fra det område, hvor dækket er i kontakt med belægningen. Dette er, i særdeleshed vigtigt ved høje hastigheder under landing. Mikrostrukturen på lufthavns befæstelser er ofte mere åbne end almindelige veje, som sædvanligvis er glattere (International Civil Aviation Organization, 1983). Vejoverfladens makrostruktur vurderes bl.a. ved måling af strukturdybden.

Mikrostruktur er præget af overfladens ruhed fra stenmaterialerne. For asfaltbelægninger afhænger mikrostrukturen især af, om de anvendte stenmaterialer er knuste eller ej, idet knuste skarpkantede korn giver en bedre friktion end uknuste runde stenmaterialer. Mikrostrukturen ændres hurtigt, f.eks. kan den dækkes af gummi fra dækket ved touch-down området, som bidrager til en væsentlig reduktion af friktionen i vådt føre. For at sikre mikrostrukturen foretages friktionsmålinger ofte ved brug af en ROAR friktionsmåler, som muliggør måling af vejbanens friktionskoefficienten. Over tid forringes overfladens mikrostruktur og deraf friktion, af mekanisk slid fra flytrafikken ved rulning, svingning og bremsning. Makrostrukturen reduceres, når hulrummet mellem stenmaterialerne fyldes med forureninger, såsom gummi, sand, sne og is.



Figur 12: Forskellen af mikro- og makrostrukturen (Kazda & Caves, 2015) (Redigeret).

6.1.1 Fleksible og halvstive belægning

For asfaltbelægninger gælder, at materialet skal kunne opnå en tilstrækkelig ruhed og friktion. Dette opfyldes ved at optimere asfaltsammensætningen, tilslagsmaterialets egenskaber og udlægningsteknikken. I asfaltbelægninger opnås dette ved anvendelse af korrekte fraktioner af stenmaterialerne i slidlaget og den korrekte procedure i udlægningen af belægningen. Dertil skal bindemidlet have en god vedhæftning til stenmaterialet.

I asfaltslidlag kan en god makrostruktur opnås ved at udlægge et åbengraderet stenmateriale, hvor der gøres brug af stenmaterialer med stor maksimalkornstørrelse. Der kan også under renovering gøres brug af en overfladebehandling eller tyndlagsbelægning, hvor friktionsskærver nedtromles i overfladen i et udsprøjtet tykt lag bitumenemulsion. Derved opnås en kombination af den åbengraderede asfalts overfladeegenskaber, samt en god forsegling af underlaget. En anvendt metode til renovering er en overfladebehandling, som eksempelvis den NCC udviklede Supergrib. Den er i princippet en åbengraderet asfaltbelægning af asfaltbeton type 11 udlagt i halve mængder i en dobbelt mængde af klæbeemulsion. Stenmaterialerne består af en særlig hård norsk granittype, som er velegnet til at modstå friktionsforringelse, som følge af afsætning af gummi fra flyhjulene i touch-down zonen (Josephsen, 2000).

6.1.2 Stive og semifleksible belægninger

Den opnåede friktion er afhængig af overfladens struktur, og denne kan etableres efter udlægning i betonbelægninger, hvor der er mulighed for en lang række forskellige overfladestrukturer, der alle vil give forskellige friktionskoefficienter. Der kan anvendes forskellige former for langs- eller tværgående rivning. Dog er den foretrukne løsning nu til dags frilægning af tilslag i overfladen. På grund af betonvejenes længere levetid kan det blive nødvendigt at reetablere en god friktion efter 20-25 år ved en let overfladeslibning.

6.2 Jævnhed og profil

Kvalitetskravene til belægningens overflade er gradvist steget med implementeringen af stadig tungere jetfly og det øgede antal af fly i lufthavnen. Jævnheden vurderes og ses på vejoverfladen, mens ujævnheder i overfladen ofte kan henføres til de underliggende lag. En ujævn overflade kan skyldes forkert materialevalg eller sammensætning, der resulterer i ujævnheder. Ligeledes kan afretningen eller komprimeringen være mangelfuld, og medføre ringe udlægning af de overliggende lag. Med et jævnt underlag minimeres risikoen for ujævnheder i de overliggende lag. Jævnheden på den færdige vej måles med en retskede eller ved en lasertest til bestemmelse af International Roughness Index (IRI værdi). Særligt landingsbanen skal være meget jævn, både af hensyn til sikkerhed såvel som komfort. En jævn overflade sikre passagerkomfort og minimal risiko for at skade flyvemaskinens komponenter. Hvor jetfly anvendes må belægningen ikke gå i stykker, således der kan forekomme løse partikler på overfladen, der kan medføre omkostningsfulde skader, hvis de suges ind i jetmotorerne. Idet jævnheden kan henføres direkte til underlaget og selve udlægningen af slidlaget, kan samtlige

belægningstyper udlægges med god jævnhed ved brug af udlægningsmaskiner. Med udlægningsmaskiner kan både de underliggende bærelag og slidlaget udlægges. Dog anvendes ofte blot dozer og grader til de underliggende lag.

Det ønskes at sikre en hurtig vandafstrømning af overfladen, således flyets dæk ikke kommer i kontakt med vandet. For at sikre dette anvendes naturlig vandafstrømning, hvor overfladevandet løber af belægningen grundet banens tvær- og længdefald. Det anbefales i Airport Design and Operationat, at profilet på landingsbaner udføres med tagprofil (Kazda & Caves, 2015). Alternativet, et enkeltsidet profil, har dog den fordel at jordarbejdet kan minimeres og at dræning kun er nødvendigt på den ene side.

6.2.1 Fleksible og halvstive belægninger

Ved asfaltbelægninger kan der forekomme ujævnheder ved samlinger, og over tid kan belægningen deformere. Deformationerne kan undgås ved at anvende bestemte typer for deformation resistente modificeringer.

6.2.2 Stive og semifleksible belægninger

De semifleksible belægninger, vil være i stand til at bevare jævnheden længere end asfaltbelægninger, grundet deres større bæreevne. De danske betonbefæstelser har førhen haft problemer med udlægningen, hvilket har betydning for jævnheden af vejen. Udenlandske erfaringer viser, at det er muligt at udlægge beton med en tilfredsstillende jævnhed. Dog kan tværfugerne ved betonbelægninger være en ulempe med hensyn til jævnhed. For at sikre at flyets dæk har kontakt med overfladen i vådt føre, kan overfladens vandafstrømning øges ved at fræse riller i betonoverfladen.

6.3 Bæreevne

Blandt de strukturelle egenskaber indgår bæreevnen af belægninger. Bæreevnen og dermed holdbarheden er afgørende for den forventede levetid, og dermed hvor ofte belægningerne skal undergå større reparationer. Befæstelsen skal være stabil og være i stand til at kunne fordele påvirkningerne fra trafikens lodrette og drejende kræfter. Hvis der er manglende bæreevne, vil dette vise sig i form af belægningsskader. Bæreevne og dermed holdbarhed er ensbetydende med vejbefæstelsens levetid.

Sikkerheden og komforten er også afhængige af vejens bæreevne. Slidlaget skal være stabilt og have en bæreevne, der sikrer, at der ikke opstår deformationer. Der kan forekomme lodrette belastninger fra flyvemaskinernes vægt, eller vandrette og skrå belastninger som følge af acceleration, bremsning og vrid under kørsel. Hvis belægningens holdbarhed ikke er tilstrækkelig, vil der forekomme belægningsskader, som forringer levetiden. Dermed vil det være nødvendigt med reparationer, der både skaber gene for brugerne, men også er uøkonomisk. Skader på slidlaget, som beskytter de underliggende lag, vil forårsage en hurtigere nedbrydning af resten af belægningen. Hvorfor det er nødvendigt, at holde slidlaget tæt og modstandsdygtigt overfor påvirkninger fra vind og vejr året rundt. Overfladen bør være vandafvisende, således vandet ikke kan trænge ind i konstruktionen og medvirke til frost og tøbrudsskader ved at vandet fryser til is og skaber frostsprængninger. Vejreglerne stiller krav til de faktorer som holdbarheden er afhængig af. Hvorved der stilles krav til vejbygningsmaterialets kornkurve, bitumenfyldning, hulrum, stabilitet, deformation samt komprimering.

6.3.1 Fleksible og halvstive belægninger

Der findes mange forskellige asfalttyper, der hver især har deres individuelle bæreevne. Endvidere gælder det også at jo tykkere laget udlægges, desto større bæreevne opnår laget. Et af de stærkeste slidlag er en skærvemastiks. Denne type asfalt har en forventet E-værdi på 3.000 MPa (Asfaltindustrien, 2016).

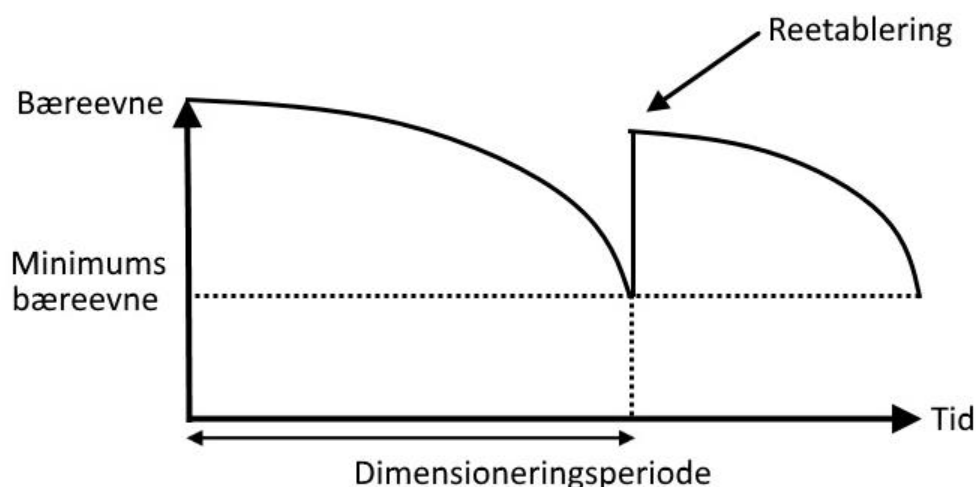
6.3.2 Stive og semifleksible belægninger

Med hensyn til bæreevnen af betonbelægninger, vil E-værdien være omkring 35.000 MPa. Bæreevnen af en semifleksibel belægning er omkring 8.000 MPa. Den større bæreevne opnås på grund af cementmørtlen, der giver belægningen en større stivhed. Levetiden vil ligge imellem en asfalt- og betonbelægning, som svarer til en forventet levetid på 20 år.

6.4 Økonomi

Vej- og lufthavnsbelægninger er ofte konstrueret og vedligeholdt af offentlige midler. Derfor er det samfundsøkonomisk relevant, at økonomien i alternative belægningsmaterialer og mulige besparelser bør undersøges omhyggeligt og være en del af belægningens designproces. Livscyklusomkostningsanalyse (LCA) er en analyseteknik, der bygger på principper for økonomisk analyse til at evaluere den overordnede langsigtede økonomiske effektivitet mellem konkurrerende alternative investeringer. Livscyklusomkostningsanalyse forsøger at bestemme den bedste værdi, som sikrer den laveste langsigtede pris i forhold til investeringsudgiften.

En lufthavnsbelægning kræver ligesom alle andre belægninger, en vis form for vedligeholdelse, for at kunne opnå en optimal levetid. Ringe eller ingen vedligeholdelse vil ofte føre til dårlig ydeevne af selv den bedst designede belægning. For at kunne vurdere vejbefæstelsens tilstand er det nødvendigt med kendskab til nedbrydning af materialerne i vejbefæstelsen og at foretage jævnlige vejinventeringer af især overfladens tilstand. Derudfra kan der gribes ind med vedligeholdelse alt efter omfanget af de skader, der er til stede. Vejbefæstelsens tilstand vil falde over tid i et accelererede forløb, hvorved omfanget af vedligeholdelse tilsvarende bliver større.



Figur 13: Belægningens bæreevne aftager med tiden (Busch & Bolet, 2016)(redigeret).

Behovet for en belægning, som er bæredygtig, holdbar og som kræver lav vedligeholdelse, er blevet meget vigtigt de seneste år på grund af det øgede fokus på miljøhensyn. Maksimal udnyttelse af banetilgængeligheden i lufthavne er en vigtig faktor for at imødekomme stigende flyudnyttelse. Her vil vedligeholdelse af belægninger kunne give besvær og forsinkelser af flyafgange.

Prisforskellen på hhv. asfalt- og betonbelægninger anvendt til motorveje er af størrelsesorden 10 – 20 %. Men forskellen er samtidig meget afhængig af lokale konkurrenceforhold og prisudvikling for både bitumen og cement (Thøgersen, 2013). Det skal tages med i betragtningen at der ved brug af asfaltbelægninger, i samme periode må påregnes 2 til 3 slidlagsudskiftninger.

6.4.1 Fleksible, halvstive og semifleksible belægninger

Fordelen ved fleksible, halv stive og semifleksible belægninger er, at det kun er nødvendigt at udskifte det øverste slidlag, hvorefter belægningen vil være som ny. De underliggende lag vil som oftest kunne holde langt længere, så længe de bliver beskyttet af slidlaget.

Den brugte arbejdstid er meget vigtig at minimere, idet befæstelserne i lufthavne ofte er udnyttet til det yderste. Derfor ser man helst at arbejdet udføres i løbet af natten, hvor der er mindre trafik og hvor muligheden for at have befæstelserne klar til dagen efter er større, eftersom asfaltbelægninger kan udlægges indenfor få timer.

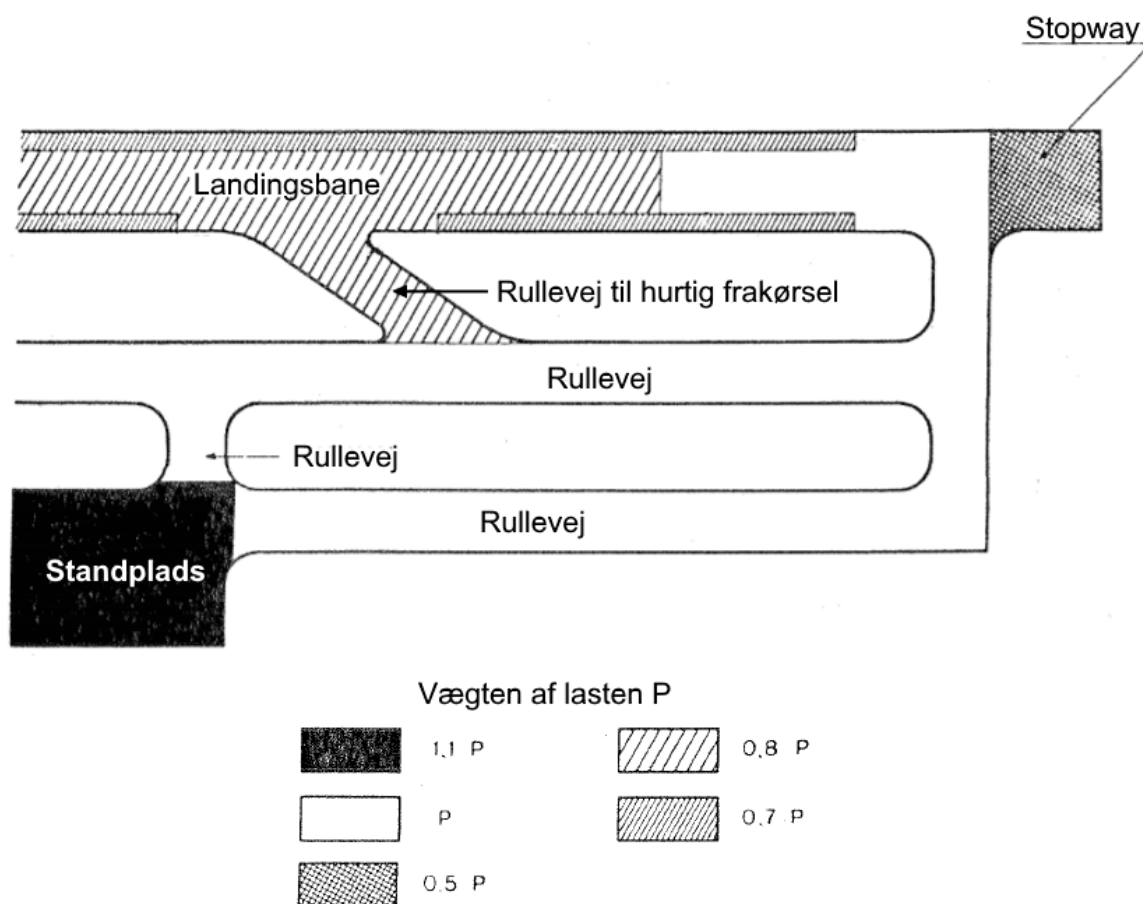
6.4.2 Stive belægninger

Anlægsomkostninger for betonbefæstelser er dyrere end asfalt. De langsigtede omkostninger for beton falder over tid, idet belægningen ikke kræver meget vedligeholdelse og har længere levetid (Thøgersen, 2013). For betonbefæstelser regnes oftest med en driftsperiode på 30-40 år, hvorimod asfalt kun har en periode på ca. 12 år. Ved renovering af betonbefæstelserne sker der en fugerenovering og eventuelt en overfladeslibning til genoprettelse af friktionen.

Når betonbelægningens levetid er nået, er det nødvendigt at udføre større reparationer. Enten ved at fjerne betonvejen og derefter reetablere den på ny. Reparation af betonoverflader og retablering efter udgravninger er som udgangspunkt mere besværlig end ved asfaltbelægninger. Der kan dog fremstilles betonblandinger der hærder så hurtigt, at belægningen kan anvendes igen efter 1-2 døgn afhængig af temperaturforhold. Derudover kan der gøres brug af præfabrikerede betonplader, som blot skal udlægges og samles med fuger. At udskifte belægningen med præfabrikerede betonplader kan gøres i løbet af et kort tidsrum, eksempelvis i løbet af en nat, hvilket er gjort i Københavns Lufthavn, ved flyvemaskinernes opstartspositioner (Saleem & Westergaard, 2012). Med præfabrikerede betonplader kan arbejdet udføres hurtigt, hvilket medfører en minimal påvirkning af den daglige flytrafik.

7 Erfaringer i danske lufthavne

Generelt anvendes de samme typer asfaltbære- og slidlag i lufthavne som på vejene. De er specificeret i henhold til de danske normer for vejbygningsmaterialer. Hver type af lufthavnens områder (landingsbaner, rulleveje, og vedligeholdelses områder) skal designes separat for at tage forbehold for variation i belastningen og frekvensen. Selvom områderne bliver belastet af den samme vægt, vil nogle belægninger blive udsat for større udmattelse ved flere gentagende belastninger. Eksempelvis er trafikken på standpladser langsom, og på landingsbanens skulder og stopway forekommer der kun sjældent trafik. Konsekvensen af den dynamiske last er mindre alvorlig, idet høj rulle hastighed ved afgang og ankomster reducerer belastningen grundet vingernes løft. De belastninger, der forekommer ved hver type område, vægtes for at tage hensyn til de forskellige udmattelser som vist i Figur 14.



Figur 14: Vægtning af lasten ud fra område (International Civil Aviation Organization, 1983) (s. 3-83 redigeret).

Til landingsbaner bruges normalt et traditionelt asfaltdesign, eksempelvis i form af 400 mm asfalt i alt placeret på ubundet grus. Overfladen er normalt tæt asfaltbeton eller skærvemastiks. Bitumen er oftest modificeret i form af SBS-polymer (Styren Butadien Styren polymer) med henblik på optimal udnyttelse af de elastiske egenskaber i såvel koldt og varmt vejr. Dermed sikres der imod revnedannelse ved eventuelle bevægelser i underlaget, selv under lave temperaturer (European Asphalt Pavement Association).

Rullevejene er opbygget på samme vis som landingsbanerne. Eksempelvis anvendes et design med slidlag af asfaltbeton eller skærvemastiks, som sammen med anvendelse af hårde bitumen typer eller modificeret bitumen har god bæreevne, således belægningen sikres mod deformationer, selvom den bliver udsat for store trafikbelastninger. Slidlaget vil være placeret på ubundet grus eller knust cementbeton (European Asphalt Pavement Association).

For de største lufthavne i Danmark anvendes cementbeton ikke mere til parkeringsområder. I stedet anvendes semifleksible belægninger, som har en række fordele. Ved brug af den semifleksible belægning undgås samlinger, som ellers vil forekomme ved udlægning af betonplader. Både de fleksible og semifleksible belægninger hærder hurtigere end beton, hvilket som tidligere nævnt, er en vigtig faktor i lufthavne. Dertil er renovering af selv mindre skader langt lettere og billigere at udføre.

Opbygningen af de tungt belastede områder i Københavns Lufthavn, som er modstandsdygtig overfor deformation, slid og spild af brændstof og kemikalier er som følgende:

SFB	100 mm
SBS modificeret AB	90 mm
GAB II	60 mm
Skærvemacadam	250 mm
Bundsikring	250 mm

8 Tendenser i udlandet kontra Danmark

På danske landingsbaner anvendes der hovedsageligt asfaltbelægninger, hvorimod der i andre lande gøres mere brug af andre belægningstyper. I Danmark er asfalt det dominerende slidlagsmateriale og kun få steder anvendes alternativer. I andre europæiske lande varierer de alternative belægningsmaterialer.

I dag består de fleste belagte landingsbaner af asfaltbelægninger i Danmark. Førhen anvendte man cement og beton materialer, hvilket stadig anvendes bredt i andre lande. En opgørelse udarbejdet af European Asphalt Pavement Association (EAPA) giver et billede af landingsbanernes belægningstyper på de vigtigste internationale lufthavne (European Asphalt Pavement Association). Af Tabel 1 fremgår det, at størstedelen af de vestlige landingsbaner er belagt med asfalt. Typen "Andre" består af belægninger i form af enten græs/grus, halvstive, semiflek-sible eller af ukendte typer.

Tabel 1: Undersøgelse af landingsbaners belægningstype i de vigtigste internationale lufthavne (European Asphalt Pavement Association) (Oversat fra kilde).

	Antal landingsbaner	Asfalt belægning	Beton belægning	Andre
Alle typer	362	226	70	66
Landingsbaner > 3000 m	126	58	37	31

Ses der kun på de danske landingsbaner, fremgår det desuden at kun én enkelt ud af 25 landingsbaner består af beton. For Tyskland ser det helt anderledes ud. Her består 11 ud af 31 landingsbaner af beton (European Asphalt Pavement Association).

Tabel 2: Undersøgelse af landingsbaners belægningstype i de vigtigste internationale lufthavne i Danmark og Tyskland. (European Asphalt Pavement Association) (Oversat fra kilde).

	Antal landingsbaner	Asfaltbelægning	Betonbelægning	Asfalt/beton	Andre
Danmark	25	19	1	5	
Tyskland	31	9	11	4	1

I mange europæiske lande anvendes beton som alternativ vejbelægning i hårdt belastede områder. Det burde derfor også være muligt for betonbelægningerne at konkurrere med asfalt både økonomisk og teknisk på det danske marked. I udlandet er kendskabet til beton større, ligeledes er erfaringerne med belægningen af det. Der benyttes i øjeblikket både asfalt- og betonbelægninger til vejbygning. Hertil anvendes moderne udlægningsteknikker, der sikre optimale muligheder for at få en veludført betonbelægning. Dette er både gældende for selve udlægningsmateriellet, men også for hvordan vejoverfladen sikre de funktionelle egenskaber (Thøgersen, 2013).

Teoretisk analyse



9 Dimensionering af vejbefæstelser

Formålet med dimensionering af vejbefæstelser er grundlæggende et ønske om at optimere belægningstykkelserne, hvorved materialeomkostningerne kan minimeres. De fleste dimensioneringer foretages i dag ved brug af regneprogrammer. På baggrund af dette redegøres der i det følgende for de metoder, som ligger til grund for programmerne.

Hvert belægningsområde bør designes separat for at tage højde for de forskellige belastninger. Nogle belægninger bliver udsat for gentagende belastninger, og andre områder kører trafikken med lav hastighed. Ligeledes forekommer der også andre laster end dem fra flyvemaskinerne, idet andet køretøj og maskineri, som busser, containervogne, lastbiler osv., til tider kan medvirke til kritiske laster.

Designprocessen involverer et stort antal variable, som ofte er svære at bestemme. Af denne grund bestemmes belægningens tykkelse ud fra teoretiske analyser af trykfordeling gennem belægninger, for derved at kunne afgøre den totale tykkelse og tykkelsen af de enkelte lag i konstruktionen. Nogle af de faktorer, som indgår i beregningen af belægningens tykkelse, er størrelsen af lasten fra fly og materiel, summen af disse laster og kvaliteten af den underliggende jord. Blandt de øvrige fysiske forudsætninger indgår kendskab til de klimatiske påvirkninger såsom frost, varme og nedbør, som vejbefæstelsen skal virke under. Disse påvirkninger og deres variation beror på de aktuelle forhold. Indenfor et mindre geografisk område vil de være indarbejdet i dimensioneringsmetoderne; eksempelvis er de dimensioneringsmetoder, som de danske vejregler angiver, afstemt, så de gælder danske forhold.

Flyets vægt fordeles ned gennem befæstelsen via landingsstellet og hjulet på flyet. Antallet af hjul, deres indbyrdes afstand, dæktryk og dækstørrelse, bestemmer trykfordelingen af flyet til befæstelsen. Overordnet skal befæstelsen være stærk nok til at bære lasten af de individuelle hjul.

På trods af at de samme typer belægningsmaterialer anvendes til vejbyggeri og til lufthavnsbyggeri, er det nødvendigt at udpege, at disse lufthavnsbelægninger behandles anderledes end konventionelle veje. Derfor skal belægningen være designet og konstrueret til at modstå langt større laster. Der anvendes en mekanistisk-empirisk designmetode, hvor belastningen stammer fra hjulet via kontaktryk fra de relevante flytyper. Samtidig gøres der brug af simulerede nedbrydningsforløb for at sikre holdbarhed og pålidelighed (Asfaltindustrien, 2016). Der findes ikke nogen fuldkommen analytisk metode til dimensionering af vejbefæstelser, idet alle eksisterende metoder indeholder et empirisk element, som det fremgår i de følgende afsnit.

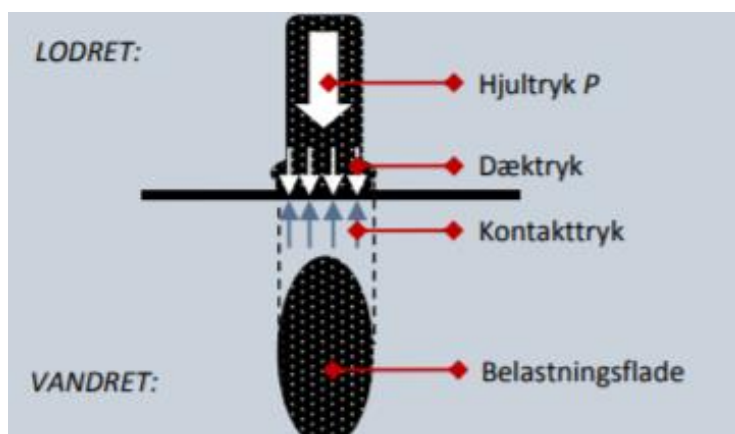
9.1 Forudsætninger for dimensionering

Det er en generel regel, at bærestyrken for landingsbaner, rullebaner og standpladser skal være i stand til at modstå den maksimale belastning, der forekommer fra flyet med den største belastning, som lufthavnen kan forvente. Et sådant fly kaldes et kritisk fly, og dets belastning er den kritiske belastning. Befæstelsen skal være i stand til at overføre den kritiske belastning til vejens underbund, uden at der opstår skadelige deformationer og sætninger i vejbefæstelse og underbund. Efter valg af materialetyper og befæstelsens opbygning, vil belægningstykkelsen hovedsageligt afhænge af, hvor stor den kritiske last er og af underbundens styrke.

9.1.1 Hjultryk og kontakttryk

Antallet af hjul, der er nødvendig for et givent fly, er hovedsageligt bestemt af dækkets bæreevne. En stor vægt på en mindre kontaktflade vil medvirke til en højere belastning af landingsbanen. Effekten af bremsning vil ligeledes også blive mindre effektiv på grund af reduktionen i friktionen mellem dæk og overflade. Belastningen fra hjulene forårsager slid og udmattelse af belægningens bæreevne i form af tøjning og trykpåvirkninger i de enkelte lag af vejbefæstelsen. Påvirkningerne fra trafikbelastningen kan beskrives ved det maksimale hjultryk, der kan forventes at forekomme og dermed også det samlede antal, der forventes i belægningens levetid. Til bestemmelse af de enkelte spændinger skal det dimensionsgivende hjultryk og kontakttryk bestemmes.

Størrelsen af hjultrykket P , se Figur 15, vil være afgørende for påvirkningen af de nedre lag, af befæstelsen og af underbunden. Kontakttrykket vil især være bestemmende for spændinger og tøjninger i den øverste del af vejbefæstelsen (Busch & Bolet, 2016).

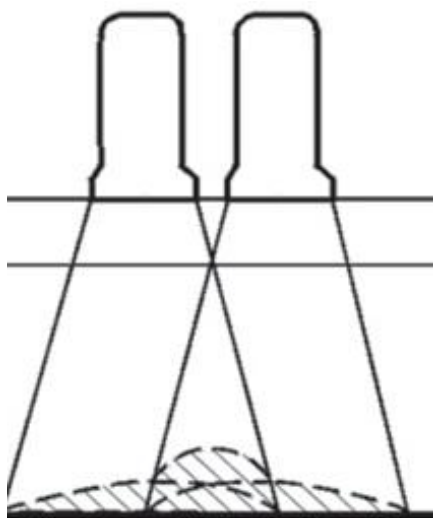


Figur 15: Kontakttryk og belastningsflade (Busch & Bolet, 2016).

De maksimalt forekommende hjultryk og kontaktryk fra et dæk er bestemmende for belægningens minimumsdimensioner. Den kritiske belastning genereres af hovedstellet, hvor hovedstellet i det simpleste tilfælde kun har ét hjul. I virkeligheden er det dog mere kompliceret, idet hovedstellet ofte har to, fire eller flere hjul, hvorfor belastningen fra de enkelte hjul skal summeres afhængigt af afstanden til et andet hjul.

Ved nogle flytyper ses det at hjulene sidder tæt sammen, og her overlapper trykspredningen for de enkelte hjul hinanden. I sådanne tilfælde må hjultrykket kombineres fra to eller flere hjul. Men det er samtidig heller ikke tilstrækkeligt at vurderer størrelsen af lasten alene, udmattelsen eller antallet af gentagende laster også medregnes.

Fra overfladen fordeler belastningen sig ned gennem belægningen til underbunden. Belastningsfordelingen ned gennem belægningen og på underbunden er afhængig af den valgte belægningsopbygning, samt af bærelagenes og bundsikringslagets tykkelse og materialegenskaber. For en fleksibelbelægning kan den gennemsnitlige belastning uden større fejl baseres på en belastningsfordeling under 45° . Altså fordelt efter en keglestub ned gennem belægningen, som det fremgår af Figur 16 (Busch & Bolet, 2016).



Figur 16: Belastningsfordeling fra dobbelthjul.

Alt efter befæstelsestype er der forskellige dimensioneringsmetoder. Dertil skelnes der som sagt imellem; fleksible, halvstive, stive og semifleksible belægninger. I det følgende fokuseres udelukkende på mekanistisk-empiriske metode for fleksible befæstelsesopbygninger, som er baseret på den ækvivalente lagtykkelses metode og elasticitetsteorien. Denne metoder kan dog også med ændringer anvendes til de andre typer belægninger.

9.2 Den mekanistisk-empiriske metodes ækvivaleringsfaktorer

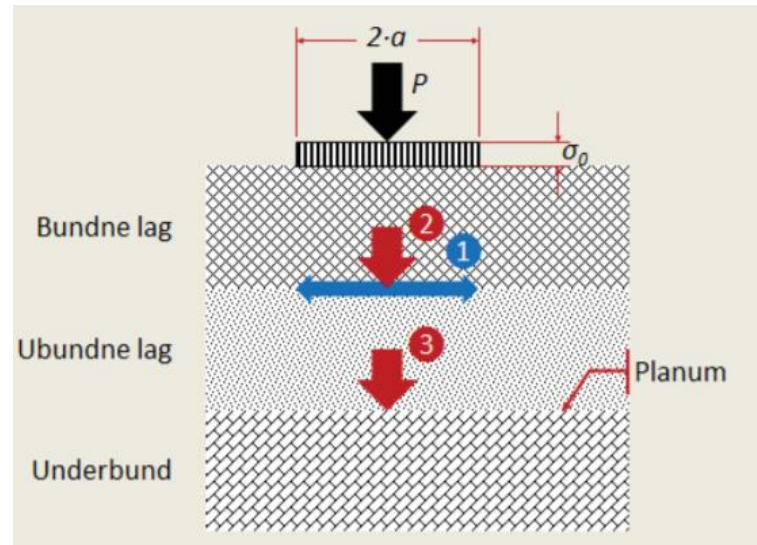
I Danmark har den mekanistisk-empiriske metode tidligere været kendt som den analytisk-empiriske metode. Denne metode er tilpasset fleksible, halvstive og stive befæstelser. Med metoden bestemmes de påvirkninger, som belægningens materialer vil blive udsat for, og derigennem kan der regnes frem til den nødvendige tykkelse af de enkelte lag i belægningen.

Metoden er todelt, dvs. mekanistisk og empirisk. Den første del omfatter bestemmelse af de tilladelige spændinger eller tøjninger i hvert enkelt lag i befæstelsen. Disse beregninger foretages ved anvendelse af empiriske relationer mellem spænding eller tøjning, antal belastninger og nedbrydningshastighed. Den anden del består i bestemmelse af de spændinger eller tøjninger, som faktisk optræder i de enkelte lag. Dette bestemmes ved en mekanistiske teori, elasticitetsteorien. I teorien forudsættes det, at materialerne er homogene, isotrope og lineært elastiske, samt at lasten er statisk og at deformationerne forsætter i en uendelig retning. Dermed antages det, at deformationerne af et lineært elastisk legeme vil have en proportional stigning med den påførte belastning.

Før den mekanistisk-empiriske metode kan anvendes, kræves kendskab til belastningen fra den dimensionsgivende trafik, og at materialeparametre for de enkelte lag i befæstelsen og underbunden er kendte. I det kommende afsnit beskrives de mekanistiske og empiriske modeller, som metoden bygger på.

De bundne lag skal især kunne modstå de vandrette træktøjninger, som optræder i lagenes underside. De bundne asfaltlag er i et vist omfang bøjningsstift, hvorfor der ved belastning vil opstå en momentpåvirkning, som vil resultere i trækspændinger i undersiden af laget. Disse spændinger vil medføre tøjninger, som ikke må overstige de maksimalt tilladelige forhold for belægningen. Spændingerne afhænger af trafiklastens størrelse og af egenskaberne for belægningsmaterialet. Spændingernes størrelse beregnes på baggrund af elasticitetsteoretiske forudsætninger og afhænger af det dimensionsgivende hjultryk og kontaktryk samt asfaltlagets E-modul og tykkelsen af dette. De ubundne lag og underbunden skal især kunne optage de lodrette trykspændinger. De mekanistiske bestemte påvirkninger (tøjninger og spændinger), som forekommer fra det dimensionsgivende hjultryk og kontaktryk, må ikke overstige kriterieværdier, der på empirisk grundlag kan beregnes for de tilladelige påvirkninger. Figur 17 viser at der ved dimensionering skal vurderes følgende:

1. Den vandrette træktøjning i undersiden af de bundne lag.
2. Den lodrette trykspænding på overfladen af de ubundne lag.
3. Den lodrette trykspænding på underbunden.



Figur 17: Den dimensionsgivende belastning og dimensioneringskriterier af den mekanistisk-empiriske metode (Busch & Bolet, 2016).

9.2.1 Ækvivalente lagtykkelsers metode

Til bestemmelse af de aktuelle påvirkninger, tøjninger og spændinger tages der udgangspunkt i Boussinesq elasticitetsteoretiske forudsætninger. Forudsætningerne har dog væsentlige forskelle fra virkeligheden (Busch & Bolet, 2016):

Boussinesqs ideal teori	Vejbefæstelsens virkelighed
• Halvuendeligt rum • Punktformig belastning • Lineært elastisk materiale • Isotropt materiale • Homogent materiale	• Lagdelt opbygning • Belastning over et areal • Elastisk-viskøst materiale • Non-lineært elastisk materiale • Anisotropt materiale • Inhomogent materiale

(Busch & Bolet, 2016)

For at tage højde for disse forskelligheder omregnes vejbefæstelsens lag, således at kun ét lag betragtes ad gangen. Hertil benyttes Ækvivalente lagtykkelsers metode opstillet af Ode-mark. Ved denne metode begynder beregningen oppefra og ned. Metoden indebærer, at de lag der ligger over en skilleflade, hvor trykspændingen ønskes beregnet, transformeres til et samlet lag med samme E-modul, som laget under skillefladen.

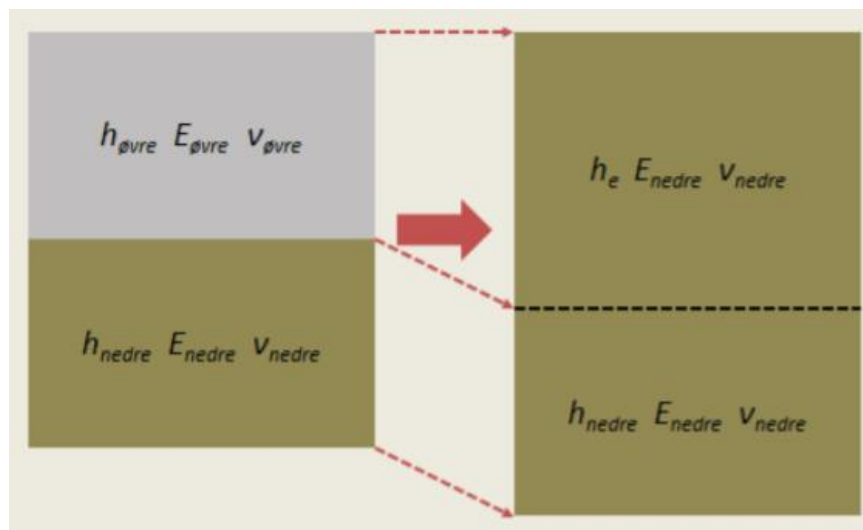
Dermed erstattes det øverste lag med et lag, der har de tilsvarende materialeegenskaber som det underliggende, og en tykkelse således laget forsat har uændret stivhed, og dermed giver samme fordeling af den påførte belastning, se Figur 18.

Ved anvendelsen af ækvivalente tykkelsers metode benyttes følgende generelle formel til bestemmelse af lagtykkelserne:

$$h_e = f \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{\text{øvre}}}{E_{\text{nedre}}}}$$

Hvor:

h_e	Ækvivalente højde af laget
f	Korrektionsfaktor
h	Højden af laget
$E_{\text{øvre}}$	E-modul for øverste lag
E_{nedre}	E-modul for nedre lag



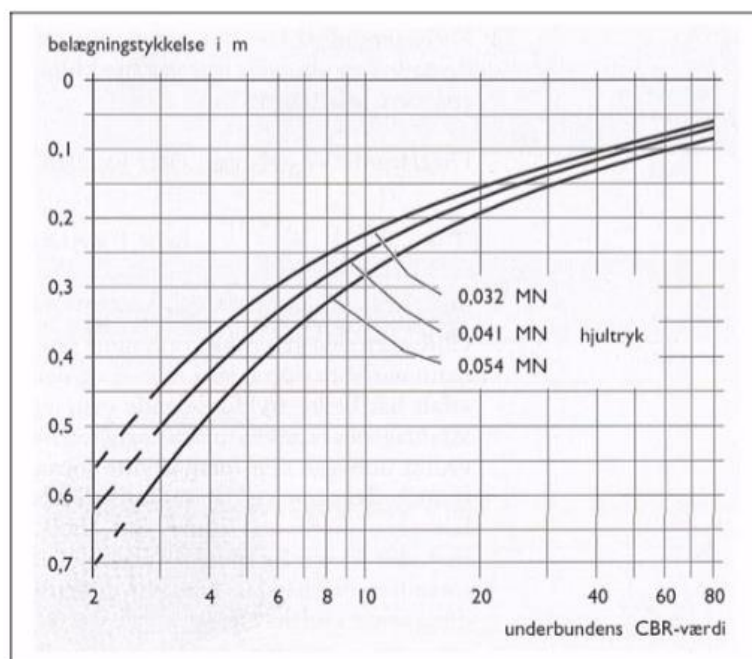
Figur 18: Princippet i ækvivalente lagtykkelsers metode (Busch & Bolet, 2016).

9.3 CBR-metoden

Mens den lagdelte elastiske metode primært anvendes i Danmark, gør andre lande fortsat brug af CBR-metoden, som har baggrund i praktiske erfaringer. Dimensionering ved denne metode foretages ud fra kendskab til underbundens styrkeegenskaber ved den såkaldte CBR-værdi (California Bearing Ratio). CBR-værdien måles ved in-situ eller ved laboratorie forsøg. CBR-forsøget udføres ved, at et stempel med givet trykareal presses ned i en materialeprøve med konstant hastighed, hvilket fører til en plastisk deformation af prøven. Underbundens E_m , kan bestemmes ud fra den målte CBR-værdi, idet E_m kan sættes til:

$$E_m = 10 \cdot \text{CBR}$$

Den målte CBR-værdi anvendes nu sammen med det dimensionsgivende hjultryk til bestemmelse af befæstelsen tykkelse, hvilket gøres ud fra et dimensioneringsdiagram, Figur 19. Ved anvendelse af CBR-metoden tages der ikke højde for de spændinger og deformationer, som optræder i befæstelsens lag.



Figur 19: Dimensioneringsdiagram til bestemmelse af belægningstykkelser på baggrund af kendskab til underbundens CBR-værdi (NCC, 2001).

10 Dimensionering og optimering ved simulering

Ved etablering af nye belægninger er det et krav, at lagtykkelsen optimeres, idet omkostninger til belægningerne ofte udgør en betydelig omkostning for projektet. De fleste empiriske erfaringer stammer fra belægninger, der er blevet belastet af en række køretøjer. Trafikken består af en blanding af standardklasser af vejkøretøjer, der har standardiserede akselkonfigurationer. I modsætning hertil opnås empiriske flybelægningsydelsesdata fra fuldskalatest, af bestemte typer fly. Med denne mere direkte og grundlæggende tilgang undgås behovet for at konvertere forskellige akselkonfigurationer til en tilsvarende belastning som en $\text{Æ}10$.

Programmet Airport Pavement Structural Design System (APSDS) anvendes til optimering af belægningsdesign (Mincad Systems, 2018). Programmet er blevet brugt af Rambøll i Københavns Lufthavn og Billund Lufthavn, hvor APSDS blev anvendt til design af landingsbaner, rullebaner og standpladser. Programmet indeholder databaser med bruttovægt og belastningsfordeling for mange civile og militære fly. Det tager også hensyn til flysammensætningen og beregner de skadelige virkninger, hver flyvemaskine kan medvirke til. Dette gør det ved at se på flytypens hjulafstand, belastning og placering i forhold til belægningens centerlinje, og på den måde kan det analysere skaden på belægningen fra hver flyvemaskine og bestemme en endelig tykkelse af hvert enkelt belægningslag, ud fra den samlede belastning.

APSDS betragter kun afgang og ignorerer ankomsttrafikken ved bestemmelse af antallet af fly gennemløb. Dette skyldes, at der i de fleste tilfælde ankommer fly til en lufthavn ved væsentligt lavere vægt end ved start som følge af brændstofforbrug. Designproceduren antager generelt, at 95 % af bruttovægten bæres af understellet ved hovedhjulene, og 5 procent bæres af næsehjulet. Landingsstellets type dikterer hvordan flyvemaskinens vægt fordeles til belægningen, og hvordan belægningen reagerer på flybelastninger (Mincad Systems, 2018).

Baseret på de beregnede og indsamlede data bestemmes belægningens PCN-værdi (Pavement Classification Number) for de enkelte strækninger. Større fly har dertil en ACN-værdi (Aircraft Classification Number), der indikerer lasten fra flyet på landingshjulene. Hvis ACN-værdien overstiger belægningens PCN-værdi, vil den ikke have den tilstrækkelige bæreevne, hvorfor denne flytype ikke må anvende belægningen (International Civil Aviation Organization, 1983).

ACN-værdien beregnes ved hjælp af to matematiske modeller, en for stive belægninger og den anden for fleksible belægninger. Flyets ACN-værdi er numerisk defineret som to gange enkelthjulslasten (udtrykt i tusindvis af kilo) ved et standarddæktryk på 1,25 MPa, hvilket kræver den samme belægningstykkel, som det egentlige hovedhjulstræk til en given begrænsningsspænding eller antal belastningsrepetitioner (International Civil Aviation Organization, 1983).

Afslutning



11 Diskussion

De resultater der er blevet præsenteret igennem rapporten, vil i dette afsnit blive diskuteret. Afsnittet vil bedømme og vurdere på erfaringsopsamlingen, den tekniske analyse og den teoretiske analyse.

Erfaringsopsamlingen har beskrevet de forskellige belægningstyper, som anvendes. Der er overordnet fundet frem til fire forskellige typer, som er inddelt efter befæstelsens bundne materialer, hvor der skelnes mellem:

- Fleksible belægninger
- Halvstive belægninger
- Stive belægninger
- Semifleksible belægninger

De fire belægningstyper er i den tekniske analyse vurderet og sammenlignet på baggrund af de funktionelle krav, som forekommer i lufthavnsbelægninger. Analysen viser, at alle belægningstyperne allerede anvendes til almindeligt vejbyggeri, og derfra vides det, at de kan efterleve kravene fra de danske vejregler og arbejdsbestemmelser.

11.1 Beton, et muligt alternativ

Beton belægninger har de nødvendige egenskaber til at indgå som et alternativ til fleksible og semifleksible belægningerne. De stivebelægningsers høje bæreevne og stivhed gør, at der ikke forekommer deformationer i belægningen, hvilke ellers er en af de store årsager til renoveringer i asfaltbelægninger.

Der kan forekomme høje omkostninger ved midlertidig afspærring af områder når belægningen skal vedligeholdes eller reetableres. I forhold til beton, vil denne belægningstype kun i et mindre omfang kræve reparationer gennem dens omkring 40 års levetid. I modsætning hertil vil asfaltbelægninger kræve slidlagsudskiftninger, for omkring hvert 12. år. Dog taler renovering af beton belægninger imod belægningstypen, idet dette er en mere besværlig proces. Asfaltbelægninger har en hurtigere udlægningsproces, hvor materialet er yderst velegnet til store såvel som små renoveringer, idet der kun går få timer fra påbegyndelse af renoveringen til at området kan anvendes igen, hvilket spiller en væsentlig rolle i lufthavne.

Idet beton er dyre i anlæggelse, men billigere i driftsfasen, kan langsigtede planlægning og længere dimensionsperioder være passende i lufthavne, hvor der ikke forventes større ændringer indenfor den fremtidig flytrafik. En længere levetid kan være passende for landingsbaner i store lufthavne, hvor fremtidens flytrafik kan prognosticeret og hvor både placering og størrelse på landingsbanerne og rullebanerne ikke forventes at ændre sig. I tilfælde af at den fremtidige sammensætning og frekvens af trafikbelastningen ikke kan forudsiges, kan det være mere fordelagtigt at designe i kortere perioder på mindre end 20 år.

11.2 Inddragelse af udenlandske erfaringer

I Danmark findes mange fagfolk indenfor vejbelægninger i asfalt kontra beton, hvorfor der er en stor ekspertise. Dog vil anlæggelse af fremtidige betonbefæstelser med moderne slippavers være en mulighed for at genintroducere belægningstypen i Danmark og samtidig give et grundlag for yderligere erfaringer. Den risiko som vil være forbundet med at introducere betonbelægninger igen her i Danmark, kunne med fordel mindskes ved at lade projektet udføres fra tyske standarder, og med en entreprenør som har stor rutine i betonbelægninger.

11.3 Videreudvikling af de teoretiske modeller

Den teoretiske analyse gør det muligt at sammenligne de dimensioneringsmetoder som anvendes. Der findes flere dimensioneringsmetoder, og teorierne bag disse er forskellige fra hinanden. Dette kan give en usikkerhed omkring hvilken metode, der bør anvendes i praksis. Alle metoderne hviler på empiriske løsninger, hvor nogle ligger mange år tilbage i tiden, hvorfor disse modeller bør kontrolleres imod den virkelige verden. Praktiske erfaringer bør omsættes til øgede forståelse for, hvad der sker i belægninger over tid og derudfra videreudvikle de teoretiske modeller så de passer bedre til virkeligheden.

12 Konklusion

Der konkluderes på rapportens analyserede problemformulering i erfaringsopsamlingen, den tekniske analyse og den teoretiske analyse. Hensigten er at belyse resultaterne på baggrund af den opstillede problemformulering:

"Hvilke forskellige belægningstyper opbygges vejbefæstelser i lufthavne af, og herunder hvilke funktionskrav stilles der til belægningen, samt hvilke teorier ligger til grund for dimensioneringsmetoderne?"

12.1 Opbygningen af belægninger

Erfaringsopsamlingen har haft til hovedformål at undersøge hvilke forskellige belægningstyper, der anvendes i lufthavne. Fire forskellige belægningstyper er undersøgt indenfor materialsammensætning og udlægningsprocedure.

Generelt kan det konkluderes at belægninger og materialerne ikke adskiller sig fra de, som anvendes til vejbygning af tungt belastede veje så som motorveje. Forskellen på almindelige vejbelægninger og belægninger i lufthavne er lagtykkelserne, som i lufthavne er større grundet højere belastninger. Vejbefæstelsen kan være opbygget på mange måder, hvor valget af opbygningen er påvirket af mange faktorer, og det endelige design er ofte et kompromis. Dette skyldes at hver belægningstype har sine fordele og ulemper i forhold til de gældende krav. Belægningsvalget skal derfor vurderes ved hvert enkelt projekt, hvor det skal være helt klart, hvad der skal vægtes højest. På baggrund af dette er det ikke muligt at komme med et entydigt svar på, hvilken belægning der vil være mest fordelagtig i de forskellige områder i lufthavne.

12.2 Funktionskrav til belægninger

Det er muligt at tage højde for selv de tungeste fly med fleksible belægninger blot ved korrekt anvendelse af stenmaterialer og modificeringer. Både produktionen af vejmaterialer og vejbygningsmateriel har fulgt med i udviklingen. Særligt anvendelse af modificerede bitumen i de bundne lag har også vundet indpas i de seneste år og gør at fleksible belægninger, med den rette opbygning, kan sikre en tilstrækkelig bæreevne for hårdt belastede områder.

Der har i Danmark været udlagt en række betonveje med varierende resultater, som kan henføres til for ringe viden om blandingsforhold og til udlægningsmetoden. Vand og cementforholdet har været for højt, tilslaget har været skyld i alkalikiselreaktioner og underlaget har ikke været stabilt nok. Det bør dog nævnes, at der har været enkelte tilfredsstillende anlæggelser af betonveje i Danmark. De dårligere erfaring har medført at belægningstypen kun i mindre omfang benyttes i landet. Udenfor Danmark benyttes beton derimod til vejbygning og til lufthavns befæstelser. Den umiddelbare grund er, at det er mere bekosteligt at anlægge end asfalt, hvorfor den fravælges, når der udelukkende ses på anlægsprisen ved et projekt.

For de halvstive belægninger med asfalt ovenpå et lag beton kan der opstå problemer ved at revner i betonen slår igennem asfalten og dermed føre til ujævnheder. Dette kan forhindres ved først at knuse betonbelægningen til mindre stykker, hvorved eventuelle pladebevægelser hindres.

Ved opstartspositioner vil flyets hjul, belaste belægningen det samme sted hver gang. Under påvirkning af høje lufttemperaturer og varme fra solen bliver asfalten opvarmet og kan give efter for flyets tunge statiske vægt, som vil medføre trykmærker i asfalten. Derfor anvendes der ofte stive belægninger ved områder med statiske laster eksempelvis betonplader. Når betonbelægningens levetid er nået, er det nødvendigt at udføre reparationer og reetablering af af betonvejen. Ved standpladser forekommer der en langvarig belastning og vridning med lave hastigheder. Derfor skal der anvendes en belægning, som kan modstå de tunge statiske laster og en overflade med tilstrækkelig slidstyrke. Ved parkering er der risiko for brændstof udslip eller spild af fedt samt olie, som kan medvirke til skader på normale asfaltbelægninger. Derfor kan der anvendes særlige materialer som f.eks. epoxy asfalt eller gøres brug af beton som et alternativ.

12.3 Dimensionering af belægninger

Belægningen skal være designet til de tungest forventede flytyper, som opererer regelmæssigt i lufthavnen og ud fra det årlige antal operationer. At være i stand til at forudsige, ved hjælp af beregninger, hvorledes belægningen reagerer, når den udsættes for last, hjælper os til at forstå hvilke egenskaber den besidder. Mange forskellige faktorer spiller ind og påvirker belægningens egenskaber gennem dens levetid, såsom klima, alder og lagtykkelse.

Den anvendte metode til bestemmelse af belægningens reaktioner, er den mekaniske-empiriske metode, som hviler på de fysiske egenskaber og en teoretisk model for at kunne bestemme spændinger, tøjningerne og deformationer. Dermed består dimensionering i princippet af følgende trin:

- Bestemmelse af kraftpåvirkninger (som hjultryk, kontakttryk, trafikintensitet og påvirkningstid).
- Bestemmelse af spændinger, tøjninger og deformationer.
- Bestemmelse af tilladelige spændinger, tøjninger og deformationer

De fleksible og semifleksible belægninger er og vil fremover forekomme som den dominerende belægning i danske lufthavne. Dette konkluderes på baggrund af asfaltens mange gode egenskaber og de mange års praktiske erfaringer med udlægningsmetoder og vedligeholdelse af belægningen. Vurderet ud fra både danske og udenlandske erfaringer, anses de stive belægninger nu som et optimalt alternativ til de asfaltbelagte lufthavnsbelægninger.

13 Perspektivering

Som situationen er i dag, er asfaltindustrien dominerende på det danske marked. Betonindustrien ville være i stand til at indføre belægningsalternativer til asfalt og dermed øge konkurrencen på området, der ville gavne prisen på materialerne. Alt afhængig af materiale omkostninger kan det med tiden vise sig, at beton ville være økonomisk attraktivt, særligt hvis vi i fremtiden ser stigende oliepriser, der forøger prisen på asfalt.

Miljø og især udledning af CO₂ er et meget debatteret emne, og der gøres mange tiltag for at reducere CO₂-udledningen. Indenfor belægningsopbygninger er der et stort potentiale i reducere af CO₂ og andre skadelige partikler ved at vælge alternative belægninger. De alternative belægninger er et argument for at anvende en større andel vegetabiliske olieprodukter til bitumen frem for jordolie. Vejbefæstelsernes livscyklusomkostninger bør forsat reduceres. Dette kræver løbende udvikling inden for områder som design, materialer, produktion samt vedligeholdelsesteknikker og ledelse, hvorved der opnås mere omkostningseffektive belægninger.

14 Litteraturliste

Asfaltindustrien. (2016). *Asfalt Håndbogen*. Asfaltindustriens Forlag.

Borgmann, J., Hougaard, H., & Nielsen, K. (2016). Når asfalt både skal være slidstærkt, holdbart og smukt. *Trafik og Veje*, 14-16.

Busch, C., & Bolet, L. (December 2016). *Forskningsportal, Aalborg Universitet*. Hentet fra [http://vbn.aau.dk/en/publications/vejbefaestelsers-dimensionering\(89d67302-118a-464a-b4b4-f0e5c60cde9d\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/vejbefaestelsers-dimensionering(89d67302-118a-464a-b4b4-f0e5c60cde9d).html)

Danmarks Statistik. (21. December 2017). *Statistikbanken.dk*. Hentet fra <https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/SelectVarVal/Define.asp?Maintable=FLYV31&Language=0>

Delatte, N. (2014). *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, Second Edition*. CRC Press.

European Asphalt Pavement Association. (u.d.). Hentet fra Airfield uses of asphalt: http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/airfield.pdf

Finans, E. (26. November 2015). *IATA: Flytrafik ventes fordoblet de næste 20 år*. Hentet fra Erhverv finans: <http://finans.dk/live/erhverv/ECE8248061/IATA-Flytrafik-ventes-fordoblet-de-n%C3%A6ste-20-%C3%A5r/?ctxref=ext>

Infrastrukturkommissionen. (2008). *Danmarks Transportinfrastruktur 2030*. Infrastrukturkommissionen.

International Civil Aviation Organization. (1983). *Aerodrome Design Manual: Part 3, Second Edition*.

Josephsen, L. (April 2000). TB k - Supergrib i Københavns Lufthavn. *Veje og Trafik*, s. 44-46.

Kazda, A., & Caves, R. (2015). *Airport design and operation 3. Edition*. Emerald Group Publishing.

Korsgaard, M. (2011). Bitumenemulsion – hvad er det? *Trafik & Veje*, 18-19.

Københavns Lufthavn. (10. November 2017). *cph.dk*. Hentet fra <https://www.cph.dk/flyinformation/indenrigsflyvninger/>

Københavns Lufthavne A/S. (u.d.). Hentet fra Interkontinental 1940-1972: <https://www.cph.dk/legacy/om-cph-old/profil/historie/interkontinental-1940-1972/>

Mincad Systems. (2018). *Mincad Systems*. Hentet fra <https://www.mincad.com.au/softover/apsds/apsdsusers/>

NCC. (2001). *Vejbygning : materialer, befæstelser, belægninger - 3. reviderede udgave*.

Saleem, S., & Westergaard, D. (2012). Fra asfalt- til betonbelægning . *Trafik og Veje*, 2.

Thagesen, B. (2000). *Veje og stier*. Polyteknisk Forlag.

Thøgersen et. al. . (2004). *Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements - An Incremental Approach*. Road Directorate, Danish Road Institute.

Thøgersen, F. (2013). *Moderne betonveje*. Vejdirektoratet.

Trafik-, bygge- og boligstyrelsen. (30. Januar 2017). *Ny passagerrekord i danske lufthavne i 2016*. Hentet fra <http://www.trafikstyrelsen.dk/DA/Presse/Nyhedsarkiv/Civil-luftfart/2017/01/Ny-passagerrekord-i-danske-lufthavne-i-2016.aspx>

U. S. Department of Transportation. (1993). *Federal Aviation Administration*. Hentet fra http://www.airporttech.tc.faa.gov/Portals/0/Documents/download/Airport_Pavements_Brochure_April_1993.pdf

Vejdirektoratet. (2013). *Semifleksibel belægning SFB - Vejl*. Vejdirektoratet.

Referencestandard: Harvard