



Andrew Dawson, Pauli Kolisoja

HÅNDTERING AF SPORDANNELSE I MINDRE BEFÆRDEDE VEJE

Overordnet sammendrag

Håndtering af spordannelse i mindre befærdede veje

OVERORDNET SAMMENDRAG

Juli 2006

Andrew Dawson
Center for belægnings teknologi, Nottingham

Pauli Kolisoja
Tampere teknologisk Universitet

FORORD

Hosliggende rapport er et overordnet sammendrag af rapporten "Permanent Deformation" fra 2005 ROADEX II. Formålet er en brugervejledning, til definition af hvorfor spordannelse kan forekomme i mindre befærdede vejbelægninger. Herved giver den rådgivning til vejere og vejentreprenører, om hvordan spordannelse kan undgås i nyere konstruerede eller rekonstruerede belægninger ud fra design, samt rådgivning til vurdering af sandsynlig spordannelse i eksisterende belægninger.

Denne rapport er ikke påtænkt som erstatning for lærebøger eller vejledninger og beskrivelser som er tilgængelige indenfor emnet. Det er håbet, at materialet kan give læseren en større forståelse for problemer og løsninger af særligt betydning for dette problem, som sjældent er tilbunds gående forstået.

Denne rapport blev skrevet af Andrew Dawson fra Nottingham Centre for Pavement Engineering at the University of Nottingham (UK) samt af Pauli Kolisoja fra Tampere University of Technology, Finland. Som leder for ROADEX III projektet foretog Ron Munro overordnet tilsyn. Mika Pyhähuhta fra Laboratorio Uleåborg designede rapportens layout.

Forfatterne vil gerne sige tak til ROADEX III styringsgruppe for deres støtte og rådgivning til dette arbejde.

Copyright © 2006 Roadex III Project

Alle rettigheder forbeholdt.

ROADEX III førende partner: Den svenske vej administration, nord region, Boks 809, S-971 25 Luleå. Projekt co-ordinator: Mr. Krister Palo.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORDORD	3
1 INDLEDNING	6
2 SPORDANNELSE	7
2.1 GENERELT	7
2.2 MÅDE 0.....	8
2.3 MÅDE 1.....	9
2.4 MÅDE 2.....	10
2.5 MÅDE 3.....	11
2.6 KOMBINEREDE MÅDER.....	11
3 GROVE BELÆGNINGS LAG	13
4 KLIMA PÅVIRKNINGER.....	15
4.1 REGN.....	15
4.2 FROST	15
5 LABORATORIE- OG ANALYTISKE UNDERSØGELSER.....	17
5.1 UNDERSØGELSES METODER.....	17
5.2 MATERIALER	18
5.3 TEST METODER.....	18
5.4 TEST RESULTATER.....	18
Stivhed	19
Plastisk adfærd.....	19
5.5 ANALYSE AF BELÆGNIG	20
5.6 RESULTATER FRA BELÆGNINGS ANALYSEN.....	20
Observationer af spordannelse i belægning (Måde 1)	21
Observationer af spordannelse i bærelag (Måde 2).....	21
6 EN SIMPEL TILGANG TIL OBSERVATIONER AF SPORDANNELSE.....	22

7 RENOVERING AF BELÆGNING	25
8 KONKLUSION.....	26

1 Indledning

I de undersøgte områder af den Nordiske Perifer, er uforseglet eller tyndt forseglede vejbelægninger almindelige. Typisk er disse veje konstrueret af et eller flere lag af knuste stenaggregater ovenpå bærelaget (Figur 1.1). Belægningernes overflade er enten sikret med tilslag eller af en tynd bituminøs forsegling med sten i ensartet størrelser. Aggregatlagene giver de væsentligste strukturelle egenskaber for belægningen i begge tilfælde.



Figur 1.1 Tværsnitsbillede af en tyndt forseglet kørebane. (Laggrænser er markeret med spraymaling) (foto: Courtesy S Erlingsson)

Kompakterede aggregater er et fleksibelt materiale. Hvis laget er for svagt, er der tendens til plastisk deformation; en smule plastisk deformation under hver hjullast. Disse deformationer akkumulerer lidt efter lidt og fremstår efterhånden i kørebanen som spordannelse. For hvert lag er denne opførsel karakteristisk. Den er størst når belastningsniveauet under hjulene er størst.

Formålet med denne rapport er at forklare hvorfor spordannelse opstår, hvilke faktorer der spiller ind, samt hvordan vejere og vejentreprenører kan minimere problemet.

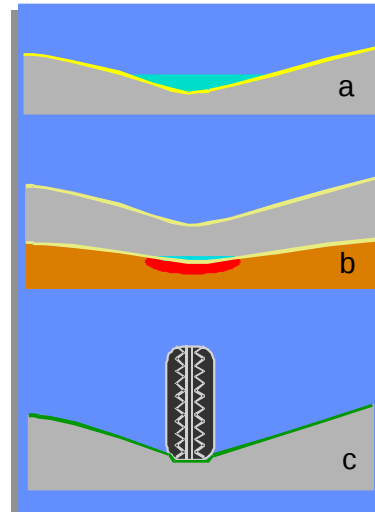
2 Spordannelse

2.1 GENERELT

Spordannelse i belægninger er højst uønsket af flere grunde (Se Figur 2.1). Sporet giver brugerne problemer med øget brændstofforbrug og risiko for skridning (på vand eller på is) – f.eks. Figur 2.2. Det giver også problemer for ejerne, da riller fremmer nedsivning af vand i belægningen, i stedet for at dræne af overfladen og dette resulterer i at vejbelægningen hurtigt nedbrydes. Vand som trænger ned gennem belægningen kan på denne måde samles i en “nedgravet” sænkning i bærelaget (se Figur 2.1) og herved mindskes bæreevnekapaciteten for de grusede lag. Det sidst nævnte vil blive gennemgået yderligere i denne rapport.

Sporkørsel i aggregater og/eller bærelag kan yderligere forårsage fejl i det øverste asfaltlag (Figur 2.3). Indirekte er sænkning normalt ikke ensartet langs med vejen, så ujævnhed resulterer i ubehag for brugere.

Mere friktion opstår imod siderne af bildækkene som resulterer i større brændstof forbrug.



Figur 2.1. Grunde til hvorfor spordannelse er uønsket:
(a= vand spor påvirker trafikken,
b= vand siver ned tildybere lag og
svækker dem;
c= forøget dækslitage)



Figur 2.2. Vand samles i et spor i en tyndt forseglet belægning.

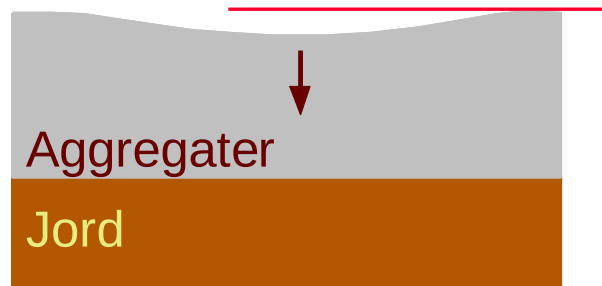
Figur 2.3. Spordannelse i dybere lag resulterer i ekstrem slitage på asfalt laget.



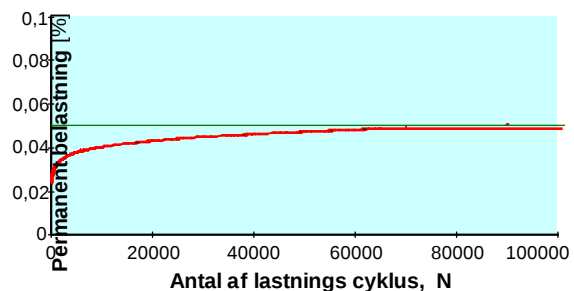
Spordannelse kan opstå af forskellige årsager. Der er fundamentalt fire medvirkende mekanismer, som her er kaldt Måde 0, 1, 2 og 3. I praksis er spordannelse ofte forårsaget af en kombination af måderne. Hver enkelt gennemgås i det følgende.

2.2 MÅDE 0

Komprimering af ikke vandmættede materialer i belægningen kan bidrage til spordannelse (Figur 2.4). Komprimering inden trafikering vurderes tilstrækkelig til at forhindre yderligere komprimering under trafikeringen. Endvidere er denne måde selvetablerende – dvs. komprimering under trafikering forhindrer yderligere komprimering (Figur 2.5). Det resulterer også i at materialet bliver stift og derfor opnås en mere jævn fordeling af belastningen. Jævnt fordelt belastning resulterer i at belastning i bærelaget mindskes, hvorved størrelsen samt risiko for sænkning i denne dybde reduceres.



Figur 2.4. Måde 0 Spordannelse – kompaktering alene i aggregatlaget



Figur 2.5. Permanent belastningsudvikling for knuste aggregater

Denne type af spordannelse ses som en snæver fordybning i forhold til den originale overflade (Figur 2.4). Det påvirkede materiale er primært tæt på hjulene. Derfor, på baggrund af dette, er begrænset spordannelse fra Måde 0 fordelagtig. Det er observeret, at god komprimering minimerer mængden af spordannelse.

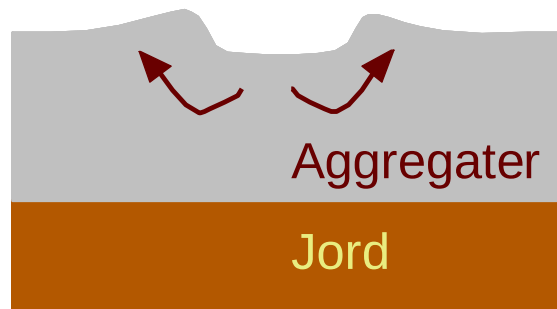
I områder med frostindtrængning hver vinter, forårsager frosten i kombination med fugt en opskydning af jord. De nyeste undersøgelser har afsløret, at selvom oftest observeret i bærelaget, kan opskydning også forekomme i aggregatlagene, især på steder hvor vand tidligere er blevet absorberet i en løs belægningsstruktur. Denne opskydning resulterer i dekomprimering af aggregatlagene. Derfor kan der forekomme efterfølgende komprimering og spordannelse (Måde 0) om foråret, når de frosne aggregater og bærelaget tør. Den naturlige variation i bærelaget resulterer i varierende opskydninger langs med belægningen og som konsekvens heraf varierende spordannelse.

Forskydningsdeformation (som nedenfor benævnes Måde 1) kan hænge sammen med forårs-tø fænomenet, eftersom de løsne aggregater bliver betydeligt svagere end i komprimeret tilstand. Resultatet kan være uacceptabelt store spor efter flere år med forårs-tø.

2.3 MÅDE 1

I svagere gruset materialer kan lokale forskydninger opstå nær hjulene. Dette forårsager opskydning umiddelbart ved siden af hjulsporet (Figur 2.6). Denne spordannelse er oftest en konsekvens af en utilstrækkelig forskydningsstyrke i de øverste aggregater. Beviser fra både testbelægninger og fra teorien demonstrerer, at den maksimale forskydningsbevægelse forekommer i en dybde svarende til ca. 1/3 af hjulets tykkelse (eller tykkelsen af to hjul ved brug af dobbelt dæk) – dvs. i en dybde på ca. 15-20 cm. I belægninger på veje hvor køretøjer ikke altid er tilbøjelige til at køre samme sted (brede veje, veje uden markeringer, veje uden eksisterende spordannelse) kan dybden være lidt mere. I belægninger med betydeligt asfaltlag ligger den kritiske dybde gerne dybere under overfladen end en tredjedel af bredden på hjulet. Dette skyldes at asfalten ændrer forskydningsfordelingen indenfor belægningen.

Figur 2.7 og 2.8 viser en skotsk vejbelægning som udviser denne type af problem. På billederne bemærkes den karakteristiske opskydning af kanter. Under overfladen kan sådan en belægning se ud som på figur 2.9. Her er den lokale forskydning, som forårsager kantdannelsen, synlig. Der er ikke tegn på deformationer i



Figur 2.6. Måde1 Spordannelse, forskydningsdeformationer i belægningens grusede lag, nær overfladen.



Figur 2.7. Skotsk skovvej udviser Måde 1 spordannelse. (Foto: Venligst udlånt af W Tyrrell)



Figur 2.8. Close-up af sporkørsel i vejbelægning af skotsk skovvej (Foto: Venligst udlånt af W Tyrrell)

bærelaget (de gule linier er påførte for at tydeliggøre grænserne på billedet).

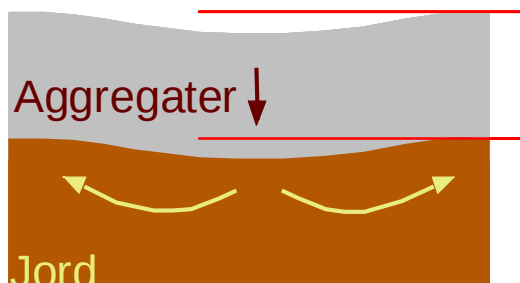
Der vil ideelt set ikke være nogen deformationer i bærelagets overflade ved denne type spordannelse. Spordannelser af denne type er ofte observeret i de nordlige områder med frostperioder. Aggregater af utilstrækkelig kvalitet og overskud af fugt som taber bæreevnekapacitet i en kortere periode, når det tør om foråret, er sandsynligvis hovedårsagen til spordannelse sådanne steder. Resten af året har det samme, genkomprimerede (se måde 0 ovenfor) og drænede materiale sandsynligvis tilstrækkelige ydeevne.



Figur 2.9. Vejbelægningen for figur 2.7 & 2.8 set som tværsnit (laggrænser malet med spraymaling) (Foto: venligst udlånt af W Tyrrell)

Den eneste måde at reparere spordannelse fremkommet på denne måde er at forbedre aggregaterne eller reducere belastningen fra bildæk. Behandling af bærelaget har ikke nogen effekt på denne type spordannelse. Det grusede materiale kan forbedres ved komprimering (indenfor en vis grænse), ved stabilisering, ved brug af geosyntetisk armering eller ved forbedring af forholdene som styrer ændringerne f.eks. ved dræning. Hovedrapporten som dette dokument er et overordnet sammendrag af har flere detaljer [se Dawson & Kolisoja, 2005]. Hvis ingen af disse løsninger virker, kan det blive nødvendigt at udskifte aggregaterne. Alternativt kan luftrykket i bildækkene mindskes.

2.4 MÅDE 2



Figur 2.10. Måde 2 spordannelse – forskydningsdeformationer i bærelaget, aggregatlaget følgende efter.



Figur 2.11. Et veludviklet tilfælde af måde 2 spordannelse set i et opgravet belægning med et meget svagt bærelag. (Foto: venligst udlånt af W Tyrrell)

Når aggregaternes kvalitet er bedre, kan hele belægningen danne spor. Figur 2.10 viser et idealiseret billede af bærelagets deformationer, mens de(t) grusede lag følger det (dvs. uden ændring i tykkelse). Overfladens nedbøjningsmønster er en bred sænkning med svag hævnung væk fra hjulet (det er fortrængningen af jord der forårsager dette). Et veludviklet eksempel på denne type svigt kan ses på Figur 2.11. I dette tilfælde er sporet blevet udfyldt gentagne gange, men spordannelsen i bærelaget er fortsat og således også i aggregaterne. Bærelaget har været nødt til at skubbe sig opad mellem hjulsporene og i siden er der et meget veludviklet eksempel på en roterende forskydning i bærelaget (vist med pile på Figur 2.10).

I områder som påvirkes af sæsonbestemt frost, er forårs-tø som diskuteret tidligere et problem, der kan resultere i Måde 2 spordannelse i bærelaget. I disse tilfælde kan Måde 2 spordannelse kun ses om foråret, når bærelaget er blødgjort i få uger af det overskud af vand som er resultat af optøningen.

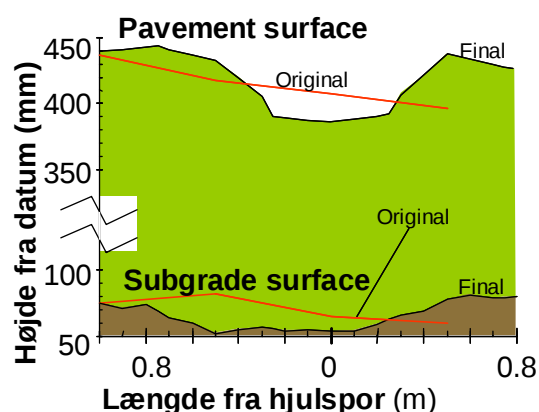
Løsningen for denne type sænkning er at forbedre eller øge mængden af tilslag, så hjullasten fordeles bedre. Derved vil belastningen på bærelaget blive mindre. En anden metode er at begrænse aksestryk (ikke dæk belastninger) da disse er den vigtigste årsag til belastning i dybden.

2.5 MÅDE 3

Partikelskader (dvs. slid eller slitage, måske fra pigdæk) kan bidrage til lignende tegn på overfladeskader som ses i model 0 sænkning (Figur 2.4) selvom mekanismen naturligvis er meget anderledes. Hvis der dannes et overskud af fine partikler kan porehullerne i aggregatet blive tilstoppede, og så vil aggregatet blive mere fugtfølsomt.

2.6 KOMBINEREDE MÅDER

I praksis vil spordannelse være en kombination af de ovennævnte mekanismer. Data fra nogle testbelægningerne i Skotland viste, ved opgravning, både et tyndere gruslag (MÅDE 1) og nedbøjninger i bærelaget (MÅDE 2) – se Figur 2.12. De lokaliserede hævnninger (eller kanter) tæt på hjulsporet er synlige og ligeså er en reduceret deformation af bærelaget i sammenligning med fordybningen.



Figur 2.12. Spordannelse observeret ved opgravning

Det er forventet, og i et hvis omfang observeret, at Måde 1 vil være mere tydelig ved kanaliseret trafikering (f.eks. som på mange skovveje) hvor trafikken til stadighed kører af samme spor. Her vil der ikke være mulighed for en tilbagefordeling og en generel komprimering af aggregat (Måde 0). Omvendt, er Måde 2 forventet mere tydelig, når trafikken ikke altid kører i de samme spor, med Måde 0 som sandsynlig deltager i dette tilfælde, eftersom bildækkenes varierende positioner virker som æltende bidrag og gør komprimeringen mere effektiv.

3 Grove belægningslag

Belægningernes strukturelle lag, som denne rapport omhandler, består næsten altid af komprimeret gruset materiale. Materialet stammer enten fra alluvial eller glacial sand- og grusaflejringer eller fra stenbrud, hvorfra materialet er helt eller delvist knust (Figur 3.1 – 3.4). Uanset hvad vil den lange afstand til etablerede, kommercielle aggregatproducenter betyde, at der er pres for at fremskaffe aggregaterne lokalt for at reducere omkostningerne. Under sådanne forhold kan materialerne være mindre ideelle.



Figur 3.1. Glacialt grusmateriale udgravet fra en aflejring, Sverige.



Figur 3.2. Metamorfisk knust stenbrud (gråsten-skifer) ved Balunton, Skotland. (Foto: venligst udlånt W Tyrrell).



Figur 3.3. Alluvial grus efter delvis knusning.

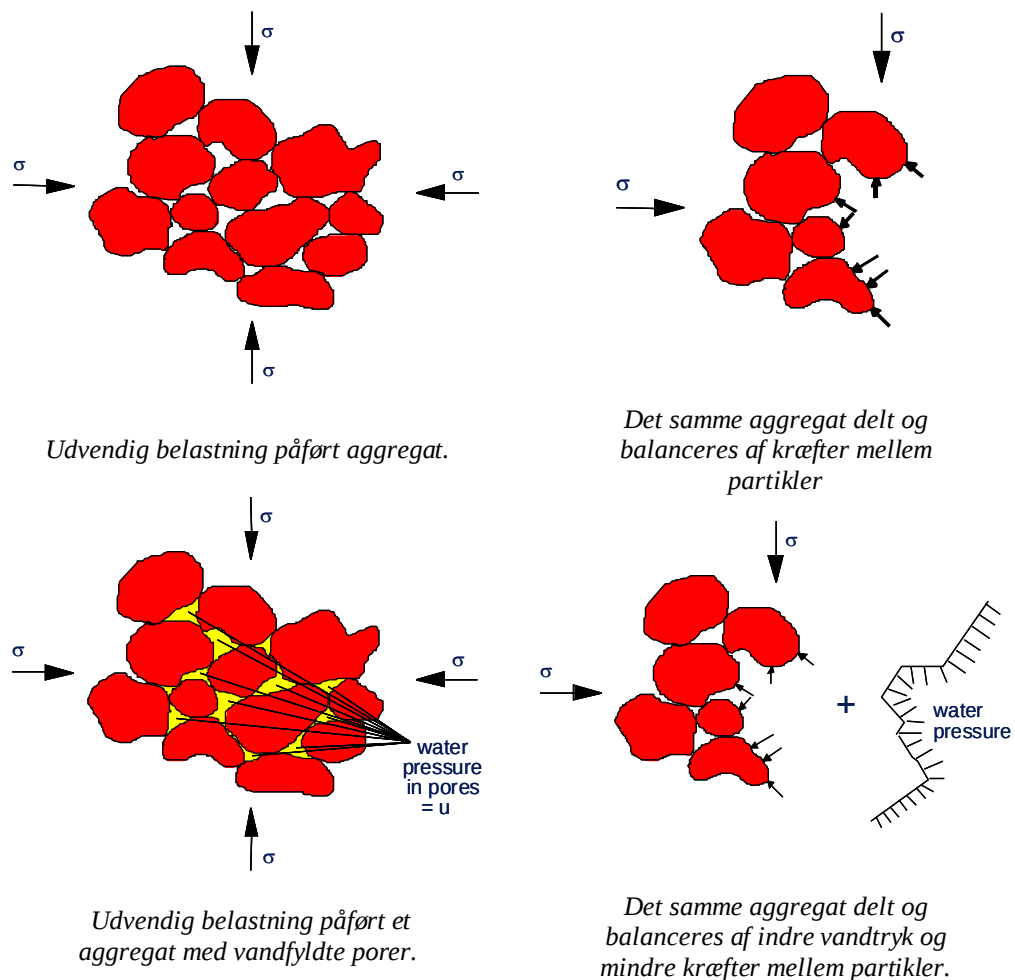


Figur 3.4. Delvis knust Alluvial grusmateriale i uforseglet belægning.

Fordi aggregater er et geoteknisk materiale, har det samme begrænsninger som andre jordtyper - særligt svækkes det af overskydende vand i hulrummene mellem stenpartiklerne. Ved lastpåvirkning vil vandet komme under tryk hvorved trykket i porerne modarbejder belastningen, som presser stenene sammen (Figur 3.5). Derfor er kontaktbelastningen mellem partiklerne ikke så stor som den kunne være.

Til gengæld betyder det at friktionen mellem partiklerne er mindre end ønsket, hvilket betyder at friktionsstyrke og modstand mod deformation er reduceret fra passende niveau. På den måde kan vand i porerne omdanne et godt grusmateriale til et dårligt.

En yderlig bekymring opstår omkring størrelserne af de partikler, som danner aggregatet. Hvis stenene er store er der tendens til, at porerne mellem dem også er store. Vand drænes let i dette tilfælde, og modstanden mod spordannelse vil sædvanligvis være ret god, selv under moderat våde tilstande. På den anden side, har finkornet materiale tendens til at holde på vand (endda opsuge vand ved kappilareffekt) og klarer sig derfor dårligt i vådt vejr og specielt under tør-perioder efter årstidsbestemt frost.



Figur 3.5. Vigtigheden af lavt porevandstryk til sikring af god belastning mellem partikler og herved god friktions karakteristisk.

4 Klima påvirkninger

I den Nordiske Perifer har klimaet afgørende indflydelse de fleste konstruktioner. Vejbelægninger er ikke en undtagelse fra denne regel. Der er af to væsentlige effekter:

4.1 REGN

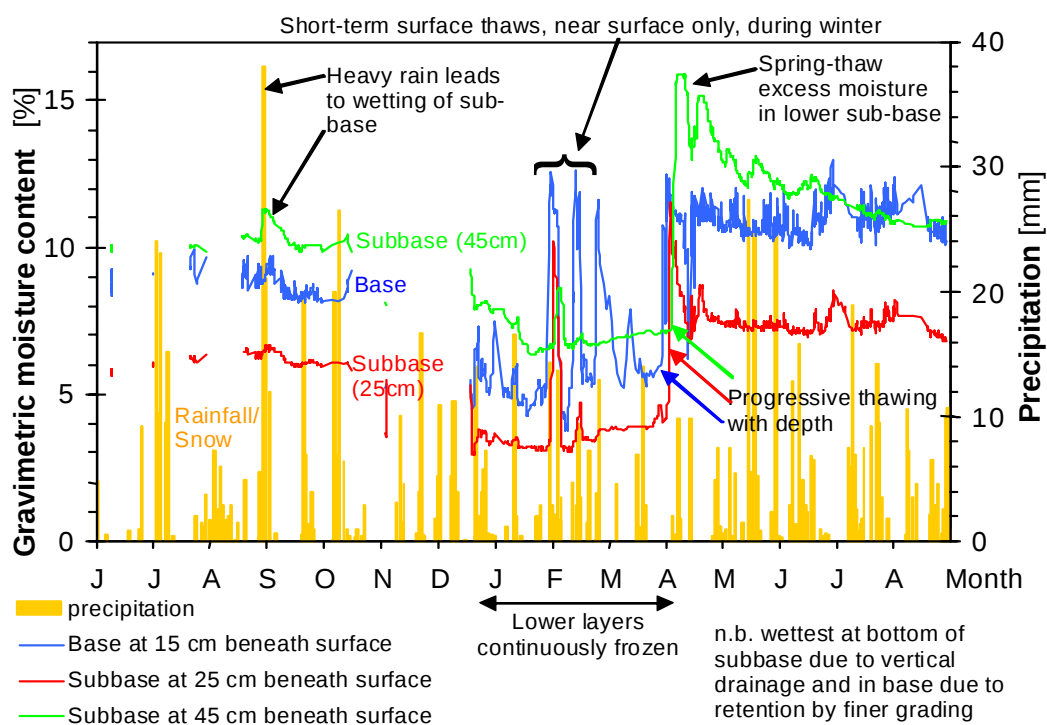
Regn har tendens til at sive ned gennem belægningskonstruktionen. I finkornede aggregater vil kapillarsugeevnen trække vand ind i konstruktionen. Effekten vil være en mindre udtalt, når overfladen er dækket med et bituminøst lag, men disse forseglinger revner nemt og lader vandet sive ind. Det er umuligt at undgå dette problem helt, men et groft aggregat, godt sidefald (>4 %) og en forseglet overflade (eller en ikke-forseglet overflade med komprimeret fint aggregat som giver delvis forsegling) vil alle begrænse indsivende regnvand. Fungerende dræn er også væsentlige. De fleste belægninger er bygget med en vis form for dræn, måske udformet som grøft ved siden af vejen. Men begrænsede budgetter betyder at vedligeholdelse måske ikke finder sted, så afdræningen med tiden ikke længere foregår som planlagt. Der er næsten med sikkerhed et aspekt af "ud-af-øje, ud-af-sind" i den manglende opmærksomhed. Der er en separat Roadex II rapport [Berntsen et al, 2005] som omhandler dræn, og som behandler disse forhold mere detaljeret. Der er også et overordnet sammendrag i den samme serie som hosliggende [Aho & Saarenketo, 2006].

4.2 FROST

Koldt vejr vil få vandet i belægningen til at fryse til is. Efterhånden som frostgrænsen bevæger sig ned gennem belægningen under en lang, kold periode, suges vand hen imod det frosne sted. På denne måde vil overskydende vand samles i belægningen som is. Når det bliver forårs-tø, vil dette vand være fanget i aggregatets porer og kan ikke sive ud, da drænsystemet stadig er frosset til. Endnu engang er en mulig forbedring, at bruge et grovere aggregat, som har en mindre sugsevne. Et groft aggregatlag i bunden af strukturen er i særdeleshed virkningsfuldt, idet det virker afbrydende på kapillareffekten, således at vandet ikke længere kan suges op til frostgrænsen højere oppe.

I begge tilfælde er problemet overskydende vand som giver formindsket friktionsstyrke (Figur 3.5), hvorved spordannelse forekommer hurtigere og mere udtalt.

Figur 4.1 viser temperatur, regn og intern tilgængelig fugt i en belægnings konstruktion. Effekten af frost og det høje fugtindhold lige efter tør er tydelig. Effekten fra store regnskyl kan også ses som midlertidige fugtighedsstigninger i belægningen. Det højere indhold af finkornet materiale i bærelaget ses også at give et højere fugtindhold hele vejen igennem og yderligere en forsinket dræning efter der er fremkommet høje fugtindhold.



Figur 4.1. Miljødata for en belægningsdel over en periode på 14 måneder. Figuren viser fri vægtanalytisk fugtindhold, givet ved TDR sensorer, i tre dybder sammen med nedbør. [COURAGE, 1999]

Figur 4.1 indikerer at der selv om vinteren er op til 5 % ufrosset vand i belægningen. Denne figur er med stor sikkerhed ikke korrekt, hvilket er en konsekvens af begrænsninger i instrumentering og fortolkningsteknik. I virkeligheden udgør ufrosset porevand sandsynligvis mindre end 0,5 % af jordvoluminet.

5 Laboratorie- og analytiske undersøgelser

Formålet med undersøgelsen er at fremskaffe vejledning til vejere og vejentreprenører om vedligeholdelse og praksis vedrørende materialevalg, for at klarlægge hvilket der fører til dårlig belægning og hvilket til god. Sigtet er med simple midler at kunne evaluere sandsynligheden for uacceptabel permanent deformation. Vejeren har således en indfaldsvinkel til at vurdere eksisterende belægning, til forbedring af design, til dimensionering af belægningen på offentlige, mindre befærdede veje eller private skovveje og et middel til at sætte grænser for last, når belægningen er i dårlig stand.

For at opnå dette blev det besluttet at bruge tilgængelige data for forskellige aggregater fra en række tidligere projekter og yderligere at supplere med specifikke undersøgelser af to aggregater med forskellige kornstørrelser og forskellige fugtindhold. Resultaterne blev brugt til at udregne belastningsforholdende i belægningen under typisk lastbiltrafik, og dette muliggjorde en estimering af sandsynligheden for spordannelse.

5.1 UNDERSØGELSESMETODER

De væsentlige undersøgelsesmetoder indbefattede:

- Test af aggregater for at finde deres respons på gentagne belastninger
- Udnyttelse af resultaterne til beregning af belastningen i belægninger udført med disse aggregater
- Udledning af hvilke dele af belægningsstrukturen, som sandsynligvis vil udvise permanent plastisk deformation under belastning
- Beregning af hvilken del af belægningsstrukturen som ville deformeres under disse belastninger og herved danne baggrund for spordannelse
- Relatering af resultater fra simple vurderingsmetoder til resultater fra tests anvendt i projektet til vurdering af aggregater. Dette blev udført, for at der er en metode til bestemmelse af en vejkonstruktions eller bærelagsjordens potentiale for spordannelse uden at anvende avancerede laboratorietests.
- Dragning af generelle konklusioner og råd ud fra undersøgelserne, i særdeleshed formulering af en procedure til design og vurdering.

Der er utilstrækkelig plads i denne opsummerende rapport til at præsentere alle detaljer af arbejdet. Endvidere vil inkludering den information sandsynligvis også være en forringelse i forhold til målet om at give et klart overblik. Derfor er få

detaljer inkluderet i denne rapport og læserne er henvist til hovedrapporten [Dawson & Kolisoja, 2005], for detaljer vedrørende afprøvning og analyse.

5.2 MATERIALER

To aggregater blev testet specifikt med henblik på dette projekt. Det ene var et skotsk, metamorft aggregat af moderat kvalitet og andet et norsk, knust grus-aggregat af høj kvalitet. Forfatterne har yderligere inkluderet data for flere andre aggregater fra en række lande. Dette indbefatter også det aggregat anvendt på stedet for miljøbelægning ("Perforstation") i det nordlige Finland. Samlet dækker dataene en bred vifte af geologiske oprindelser, kornstørrelser, stenkvaliteter, former osv. Hovedvægten af materialer, ud fra hvilke konklusionerne fra denne rapport er fremkommet, stammer fra nedknuste bjergarter, men nogle sand- og grus-aggregater er også blevet studeret. Aggregaterne blev studeret indenfor et udvalg af forskellige vandindhold og partikelstørrelser, medens nogle tests blev udført efter fryse/tø.

5.3 TEST METODER

Den oftest benyttede test var den gentagne triaksiale last test, som måler udviklingen af permanente deformationer. Dette er laboratorieudstyr, som er i stand til at simulere virkningen af gentaget trafik med mange tusinde køretøjer på aggregater. Denne simulering kan opnås på få timer. Aggregatet kan opbevares ved belastninger og fugtindhold som svarer til de, der er erfaret for vejen. Testene blev udført på de forskellige aggregater ved forskelligt fugtindhold, nogle efter fryse/tø og for forskellige belastningsniveauer - hver belastningspuls blev anvendt mange gange. Flere andre typer af tests blev udført bl.a. styrke og stivheds (modulus) tests, sigteanalyser, komprimeringsundersøgelser og dielektriske målinger (Tube suction apparatus).

5.4 TEST RESULTATER

Fra disse tests blev det vist, at dielektriske værdier kan give en indirekte indikation af mekaniske egenskaber. Fra undersøgelserne er det foreslået at dielektriske egenskaber fastsættes (Saarenketo et al., 1998) for at undgå at de dårligste grusaggregater bliver overvejet til vejbygning. Værdier >9 er sandsynligvis forbundet med en temmelig dårlig modstand mod permanent deformation. Dette fører sandsynligvis til uacceptabel opførsel i områder med fryse-tø perioder om vinteren. En værdi >16 hænger uden tvivl sammen med uacceptabel dårlig modstand mod permanent deformation under alle klimatiske forhold.

Stivhed

Testene viste en meget tydelig ændring mekanisk adfærd ved tilsætning af fine partikler og ekstra fugt. Det blev fundet, at aggregater med flere fine partikler nåede meget større vandindhold, fordi de finere porer mellem partiklerne kunne holde mere vand end det er muligt for grovere blandinger.

Når mere vand tilføres prøven reduceres stivheden. I praksis betyder dette at finere aggregater har en tendens til at være vådere aggregater og at lag i belægningen, som består af sådanne aggregater ikke fordeler belastningen så godt. Til gengæld betyder det, at belastningen på bærelaget vil blive større. Større belastning på bærelaget resulterer i forøget spordannelse i bærelaget (Måde 2 fejl beskrevet i sektion 2).

Plastiske adfærd

Under mange gentagne belastninger som det ses for en belægning med trafik, vil plastiske deformation akkumuleres gradvist. Figur 5.1 viser de typer af reaktioner der er målt. Reaktionen på område A er den ønskede fordi ændringen (set i belægningen som spordannelse) sker i starten men stopper til sidst. Ændringen (spordannelsen) som område A typen standser ved er meget afhængig af aggregatets vandindhold.

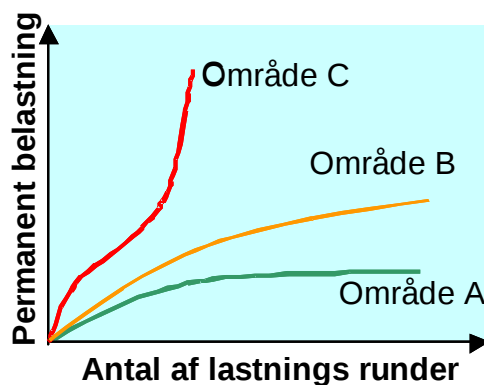


Figure 5.1. grafisk permanent belastningsreaktion

Analyse af og erfaring med grusede belægninger viser at få aggregater, hvis nogen, kan skabe område A adfærd direkte under trafikpåvirkning. I stedet er område B reaktionen sandsynlig for en god uforseglet eller tyndt forseglet vej. Område A reaktionen kan opnås ved brug af et tykkere asfalthag (f.eks. >80mm). Målet for en ingeniør med en uforseglet eller tynd forseglet vej må derfor være at opnå område B adfærd og ikke område C adfærd, som vil resultere i et hurtigt sammenbrud i belægningen. Yderligere bliver ingeniøren nødt til at holde hældningen for område B så lav så muligt, dermed forlænger vejbelægningens levetid.

Det blev fundet, at tætheden til statisk fejl er meget vigtig i forbindelse med udvikling af plastisk deformation. Når en bestemt belastning blev anvendt gentagne gange på en prøve af aggregater, blev prøven udsat for en plastisk belastning. Når en prøve med samme fugtighed og tilstand blev udsat for en højere belastning gentagne gange, blev den plastiske belastningsniveau større. Frekvensen ved hvilken plastisk belastning akkumuleres blev fundet at relatere ret godt til den anvendte belastningstilstand som er nødvendige for at forårsage fejl under en enkelt last.

Summarisk er det fundet både fra detaljeret undersøgte materialer og via informationer tilgængelige fra andre kilder, at størrelsen af den plastiske belastning i et tilslag forøges:

- Når aggregaterne bliver våde,
- Når aggregaterne fryser og tør igen.
- Når den anvendte belastning nærmer sig niveauet for den statiske fejlsituation

I forhold til design, betyder de ovennævnte resultater, at det er fornuftigt at sikre at de belastninger som findes i de forskellige zoner af belægningens aggregater ikke overskrider en vis del af belastningen for overbelastning. Tidligere undersøgelser har foreslået at den anvendte "overbelastninggrænse" for belastning ikke må være mere end 70 % af hvad der behøves for at fremkalde statisk overbelastning, alt andet lige. Data der er opnået i denne undersøgelse viser at dette i sandhed er en fornuftig bestemmelse. Derimod antyder de testede materialer at denne grænse skulle sættes til kun 50- 55 % når aggregatet er meget vådt og fint materiale forhindrer hurtig dræning, eller under forhold med forårs-tør, for at undgå spordannelse. Resultater fra Tube Suction tests er også anvendelige til at afgøre, om aggregatet er 'vådt/fint' eller 'normal' (dvs. er 50-55 % belastnings grænsen gældende eller 70 % grænsen?). Resultaterne viser at den dielektriske værdi <9 (ofte forbundet med et poretal >0.33) definere denne grænse.

5.5 ANALYSE AF BELÆGNINGEN

Data fra bøjeligheden (modulus værdier) opnået ved laboratorietests blev benyttet i en computermode til forudsigelse af belastningsniveauerne i de forskellige typer og tykkelser af belægninger. Analyserne blev udført med asfalt med varierende tykkelser fra næsten nul (1mm) til 200mm, men kun resultaterne fra de tyndere asfaltbelægninger er reelle til brug i dette projekt.

5.6 RESULTATER FRA BELÆGNINGSANALYSE

Fra computeranalyserne af belægningerne er det muligt at beregne belastningerne i dem. Beregningerne er ikke helt simple idet aggregaterne har en modulus (stivhed) som afhænger af den belastning det mærker, og som igen til en vis del afhænger af modulus. Derfor er en iterativ analyse nødvendig. Så snart en ligevægt på belastningerne og modulus er fundet, kan den sandsynlige hastighed for at opbygge en plastisk belastning blive estimeret i et hvert punkt af belægningens aggregat ved brug af gentagne triaksial lastningsprøvedata.

Observationer af spordannelse i aggregatlag (Måde 1)

Beregningerne viste, at et asfaltlag bør være tykkere end en tærskel (Muligvis >4cm) for at opnå en jævn fordeling af belastningen og betydelig formindskelse af belastning på de lavere liggende aggregater. Ellers vil laget dække men ikke være effektiv i forbindelse med beskyttelse af aggregatet fra store belastninger på grund af trafik.

Som beskrevet i sektion 5.4, er næsten statisk overbelastning relateret til den hastighed, hvormed spordannelse opstår. Analyserne viste, at aggregatet er tættest på statisk overbelastning i en dybde på 10 - 15cm i belægningen (omkring 9 og 14 cm henholdsvis i aggregatet). Så, det er i denne dybde at konstruktøren må mindske belastningsniveauet, væk fra overbelastningsniveauet for at mindske spordannelse. Dette kan opnås ved at flytte overbelastningslinien (f.eks. ved at forbedre grus materialet ved dræning eller stabilisering) eller ved at anvende et tykkere asfaltlag.

Som et eksempel blev denne indgangsvinkel anvendt på et skotsk aggregat. På en ret tør prøve med moderat fine partikler var maksimalbelastningen mellem ca. 65 % (2 cm asfalt) og 80 % (1cm asfalt) i forhold til statisk overbelastning. Observationer af opførslen af dette materiale på stedet viste at de har tendens til spordannelse under trafik i vådt vejr. På baggrund af in-situ erfaringen, kunne et kriterium på 75-80 % af statisk overbelastning styrke været hensigtsmæssig for dette materiale for at undgå spordannelse. Dette er på linie med det publicerede fra andre kilder.

Observationer af spordannelse i bærelaget (måde 2)

Efterhånden som tilslagslaget bliver tykkere bliver belastningen på bærelaget formindsket. Analyser blev udført med forskellige tykkelser aggregatlag, og de påførte belastninger ved bærelagets top blev beregnet for flere forskellige aggregater, som var testet i laboratoriet. Resultaterne viser klart at en reduktion i fugt og i forholdet af finkornede partikler resultere i aggregater, som kan fordele lastningen meget bedre, og herved reducere lasten på bærelaget. Beregninger viser også at tykkelsen af aggregatlaget må øges mellem 14 % til 73 % i forhold til tørre, sorterede aggregater. En øgning af tykkelsen fra mellem 85 % og 92 % var beregnet som nødvendig for aggregater, som var blevet udsat for fryse-tø. Aggregater med et mere finkornet materiale gav lignende nødvendige tykkelser som givet for våde aggregater. I forbindelse med måde 2 spordannelse (bærelag) kan renere og tørrere materialer kan blive brugt mere tyndt for at opnå samme ydeevne. Nogle gange kunne tykkelsen næsten halveres og den samme modstand mod spordannelse blev opretholdt.

6 En simplificeret tilgang til implementering

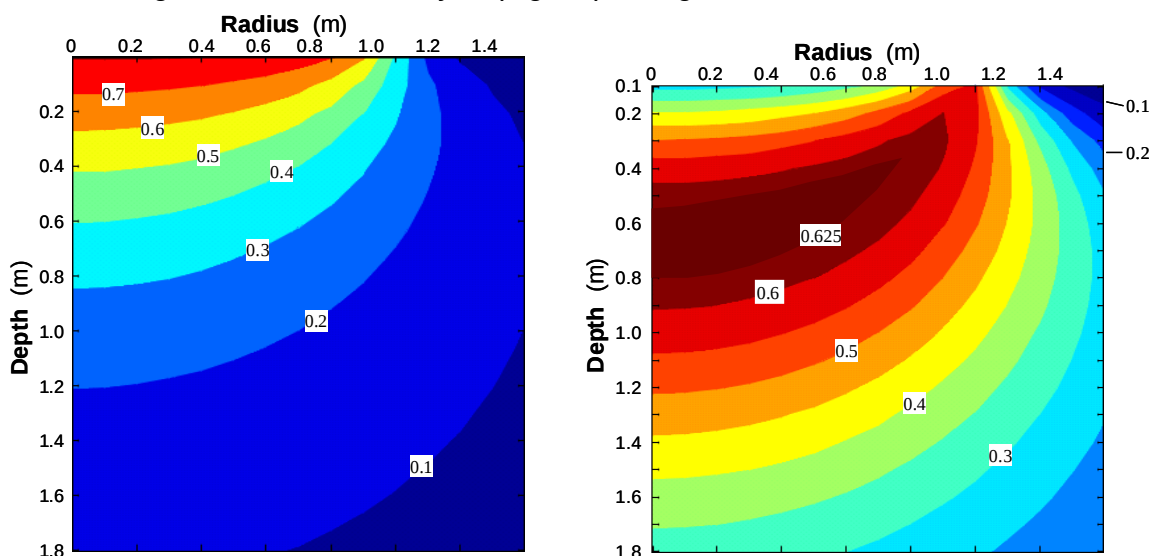
På baggrund af resultaterne fra laboratoriet, computeranalyserne, publicerede data samt erfaringer fra undersøgelsesgruppen, er der blevet udviklet en procedure til implementering af resultaterne. Ud fra dette er der udviklet en forenklet fremgangsmåde, som muliggør at sammenholde den fundamentale forståelse af materialets egenskaber, modeller for spordannelse og belastningsanalyser. Proceduren er praktisk anvendelig for ingeniører i de nordlige egne. Det er temmelig usandsynligt at disse ingeniører vil få tid, råd, ekspertise eller adgang til værktøjer til udførelse af en undersøgelse, som den der er udført i dette projekt. Så den foreslåede fremgangsmåde bygger på enkle teknikker som beskrevet i Sektion 5.



Figur 6.1: Tube Suction Meter

Følsomheden overfor fugt bestemmes ved brug af Tupe Suction test (se Fig. 6.1) (dog kan poretallet anvendes som første vurdering af drænevne). En aggregatprøve komprimeres, fugtes og derefter afvandes. Hvis den dielektriske værdi fra Tupe suction er høj efter denne behandling, så kan dårlig ydeevne forventes. Graden på ydeevnen (god eller dårlig) kan fastsættes på følgende måde.

For at finde belastningerne i belægningens aggregatlag tæt på hjulet, gives charts over sandsynlige belastninger, som findes i belægningen. Dette er gjort for at erstatte begrænset element analyse (Fig 6.2). Brugen af disse charts er beskrevet



Figur 6.2. Belastninger (udtrykt som en brøkdelt af dæk trykket) under et område på 1m i radius. Venstre=middle belastning. Højre= diatonisk belastning.

mere detaljeret i hovedrapporten [Dawson & Kolisoja, 2005]. Boussinesq's belastningsanalyse danner grundlag for disse charts, eftersom analyserne ikke kræver værdier for modulus (stivhed) for aggregatet. Denne metode virker ikke hvis der er et asfaltlag, da Boussinesq's metode antager at der kun er et lag i belægningen, men den tilnærmer uforseglede belægningers belastninger, som er et mere kritisk tilfælde.

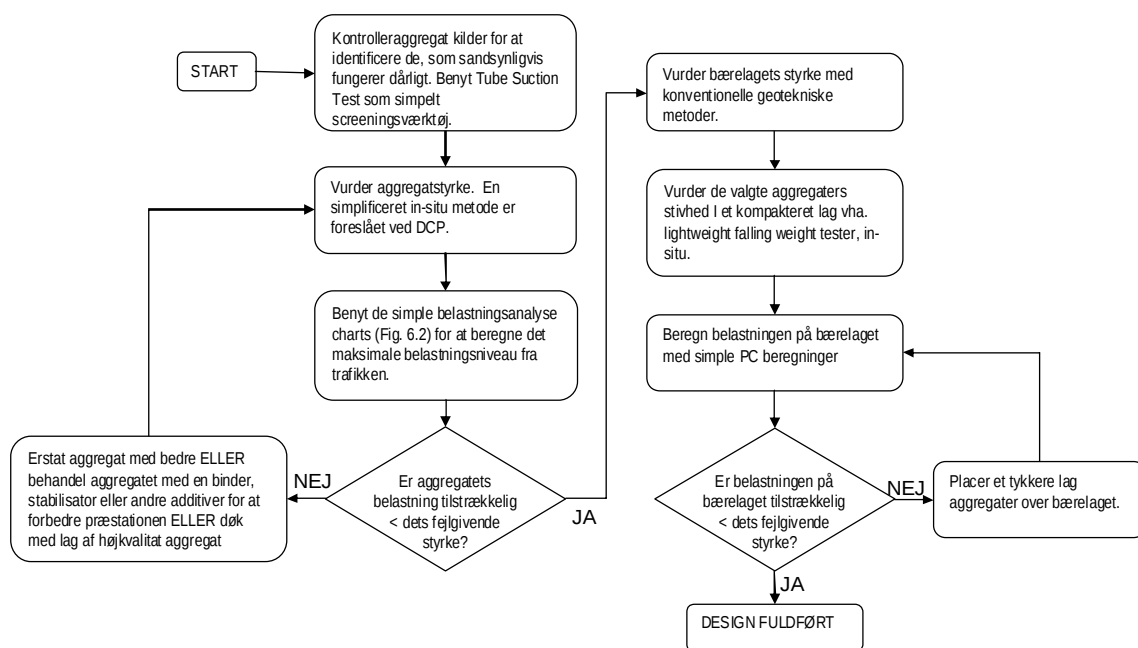


Figur 6.3 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

For at vurdere styrken på tilslaget anbefales Dynamic Cone Penetrometer test (se Fig 6.3). Det er en simpel metode som giver hurtige (skønt upræcise) mål. Belastningen kan dermed sammenlignes med den foreliggende styrke og aggregatets anvendelighed i belægningen kan fastsættes.

Disse skridt giver en vurdering af aggregatet, og hvis nødvendigt, planlægning af forbedring eller belastningsreduktion (f.eks. med asfalt). For bærelaget kan belastningen blive beregnet ved brug af et enkelt, offentlig tilgængeligt PC program. Styrken af bærelaget kan måles med (f.eks.) vinge-test på lerjord. En sammenligning af de to værdier kan derefter blive brugt til at øge tykkelsen af aggregatet indtil belastningen på bærelaget er reduceret til et acceptabelt niveau.

Den overordnede procedure, ved brug af de metoder som lige er præsenteret, er vist som et diagram på Figur 6.4.



Figur 6.4 Oversigtsdiagram viser konstruktions/bedømmelses fremgangsmåde

7 Renovering af belægning

Mange ingeniører vil være mere beskæftigede med vedligeholdelse og istandsættelse af eksisterende belægninger end nybygning. I princippet kan samme tilgang bruges. Vurdere belægninger på stedet med DCP (aggregater) og vingeanalyse (ler og silt bærelag) samt forudsige efterfølgende ydeevne på samme måde som givet. Hvis konstruktionens tykkelse er for lille og sporkørsel i bærelaget kan måles, så skal den nødvendige tykkelse opnås ved påfyldning af aggregat. Hvis kvaliteten af tilslaget ikke er høj nok så kan der påfyldes et ekstra tykt lag på toppen og metoden kan som nævnt blive brugt til at vise om belastningen på det gamle, begravet, tilslag er acceptabel.

Tube Suction test af tilslagsmaterialet kan også udføres for at kontrollere af fugtfølsomheden.

Generelt vil det være nødvendigt for ingeniører at sikre at et repræsentativt prøvemateriale er taget fra vejen. Dette er nødvendigvis ikke en nem opgave, da adskillelse af uforseglede aggregater på grund af trafikering og omprofilering ofte vil give atypiske kornfordelinger henover belægningen, mens forstyrrelser fra frost, vandtransport samt sænkninger også være faktorer der spiller ind for en ujævn fordeling af finkornet materiale igennem belægningen.

8 Konklusion

Formålet med undersøgelser, laboratorietests, computeranalyserne og de fremlagte fortolkningerne er at levere en forenklet metode til konstruering vejbelægninger for mindre befærdede veje i den Nordiske perifer. Metoden bygger grundig teoretisk forståelse. Erfaringsbaserede synspunkter har stor værdi, men hjælper ikke til at skabe forståelse for nøglebegreber, påvirkninger og respons. Derfor, ved at kombinere den bedste teori samt erfaringer, vil de skitserede løsninger søge at give en praktisk forbedring for ingeniører der er ansvarlige for mindre befærdede veje, som dem der findes i Nordeuropa.

Der er stadig mere arbejde der skal udføres med justering af de foreslåede parameterværdier. Ikke desto mindre er det håbet at de præsenterede data vil give incitament til vurdering af materialer med de nævnte metoder, samt for at sammenligne forudsete ydeevner med virkelige ydeevner. På den måde kan udbytte på længere sigt stige, hvis marginale materialer kan blive indført i motorvejskonstruktioner med en større grad af garanti for at er anvendelige under belastningen uden at de i sig selv giver problemer med spordannelse. På samme måde kan udbyttet på længere sigt for disse materialer være forhindring af spordannelse i bærelaget.