



# Fleksible belægninger med asfaltarmering

## - Mekanisk beregningsmodel



**AF JULIUS NIELSEN**  
S&P Reinforcement  
Nordic ApS  
Julius.nielsen@  
sp-reinforcement.eu

I dag findes ingen anerkendte programmer, der kan medregne asfaltarmering til dimensionering og analyse af fleksible belægninger. Først og fremmest vanskeliggør det vejingeniørens opgave, når der skal dimensioneres stærke belægninger med asfaltarmering, og dernæst forbliver hele idéen med asfaltarmering til uforløst potentiale, der ellers ville kunne medbringe mere robuste løsninger til dimensionering af vejbefæstelser. For at tilvejebringe løsninger på dette problem har S&P Reinforcement Nordic i samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet igangsat et erhvervs-ph.d. projekt, der har til formål at skabe et beregningsprogram, der kan medtage effekten af asfaltarmering i fleksible belægninger.



**AF KLAVS OLSEN**  
S&P Reinforcement  
Nordic  
Klavs.olsen@  
sp-reinforcement.eu

### Baggrund

Vejbelægningssystemer har fundamental indflydelse på de sociale og økonomiske aspekter i et velfungerende samfund. I de seneste år er der i stigende grad blevet sat højere krav til vores belægninger i form af mere tung trafik på vejene, og dermed et øget behov for vedligeholdelse og forstærkning. Samtidig sætter udviklingen af selvkørende biler ekstra pres på belægningskonstruktionerne, idet mere ensartet køremønstre vil medføre accelererede effekter på skader som sporkøring og revnegenslag. Endvidere vurderer flere eksperter, at kapaciteten af køretøjer på vejene vil tage nye højder med selvkørende biler, da de vil tiltrække en større del af trafikken med private biler, hvor flere vil vælge bilen frem for tog eller bus. Alt taget i betragtning, så skaber dette nye udfordringer til måden at dimensionere vejene på med en efterspørgsel på stærke og robuste løsninger.

Givet, at asfaltbelægninger er den mest anvendte belægningstype på verdensplan, er en måde at imødekomme disse nye udfordringer på at introducere asfaltarmeringsnet i vejbelægninger. Mange af disse forstærkningsnet er født med en høj stivhed, samt trækstyrke, som er med til at reducere forskydning- og trækspændinger i asfaltlagene. Tilføjelsen af asfaltarmering kan også være med til at reducere CO<sub>2</sub>-udledning, samt reducere livscyklusomkostninger til gavn for samfundet. »



**AF EVAL LEVENBERG**  
DTU Byg  
eylev@dtu.dk



**AF ASMUS SKAR**  
DTU Byg  
asska@byg.dtu.dk

### FAKTABOKS

I dag udvikles og fremstilles asfaltarmering som typisk består af kulfibre eller glasfibre, der er formet som fleksible forstærkningsnet.

**FAKTABOKS**

Asfaltarmering installeres nemt ved at rulle det tynde gitterlag ud på en emulsionsbehandlet overflade, hvorefter asfaltoverbygningen udlægges.

**Projektidé og formål**

En af nutidens problematikker og udfordringen ved brugen af asfaltarmering er, at konceptet, og dermed armeringsbidraget, ikke kan medtages i dimensioneringsstandarder. Dette gælder både for dimensionering af nye belægningskonstruktioner og reparation af eksisterende belægninger. Derfor er S&P Reinforcement Nordic ApS og Danmarks Tekniske Universitet (DTU) gået sammen i et projektsamarbejde, der har til formål at formulere og udvikle en beregningsmodel til netop dette. Baseret på videnskabelige principper inden for bl.a. mekanisk modellering, skal beregningsmodellen give ingeniører muligheden for at analysere og vurdere effekten af at inkludere asfaltarmering i vejbelægninger. Som en del af forskningsprojektet vil fuldskala forsøg (baseret på innovative målemetoder), samt laboratorieforsøg blive brugt til at understøtte og

kalibrere beregningsmodellen med målinger fra virkeligheden.

Hypotesen i projektet er, at asfaltarmering kan modelleres som en tyndt lag med et højt E-modul i et lagdelt elastisk halvrum, et teoretisk koncept, der danner grundlag for langt de fleste dimensioneringsprogrammer i dag. Andre teoretiske antagelser vil blive tillagt modellen, som eksempelvis: (i) fragmenterede/revnede lag, (ii) vedhæftning mellem lag, (iii) vandrette kræfter, (iv) viskoelastiske materials egenskaber og (v) anisotropisk materials opførsel.

**Indledende analyse af mekanisk model**

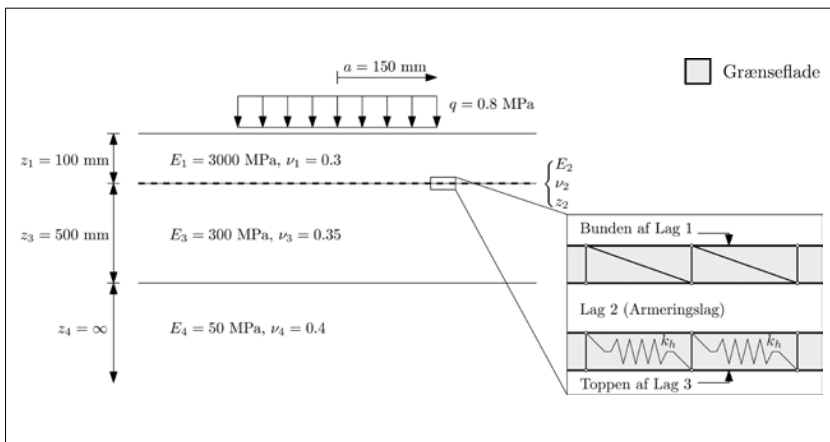
Denne sektion vil gennemgå en projektindledende sensitivitetsanalyse, baseret på en lineær elastisk model, der kan justere vedhæftningsevnen mellem lag. På Figur 1 ses en simpel trelags belægning, som skal repræsentere en opbygning med hhv. et asfaltlag, et ubundet bærelag, samt en underbund af jord. Imellem de to øverste lag (asfalt og bærelag) er der indlagt et armeringslag, der modelleres som et lag med en høj stivhed og en tynd tykkelse. Typiske mekaniske parametre ( $E_i, \nu_i$ ) og lagtykkelser ( $z_i$ ) er valgt for de typiske belægningslag. Vedhæftningsevnen mellem to lag (i dette tilfælde mellem asfalt

og armering) kan modelleres som en horisontal fjeder, karakteriseret ved en fjederkonstant  $k_h$  (enhed af kraft/længde<sup>3</sup>). For  $k_h \rightarrow \infty$  forudsætter en situation med fuld horisontal kraftoverførelse mellem de to lag, hvorimod  $k_h = 0$  svarer til en situation med nul kraftoverførelse.

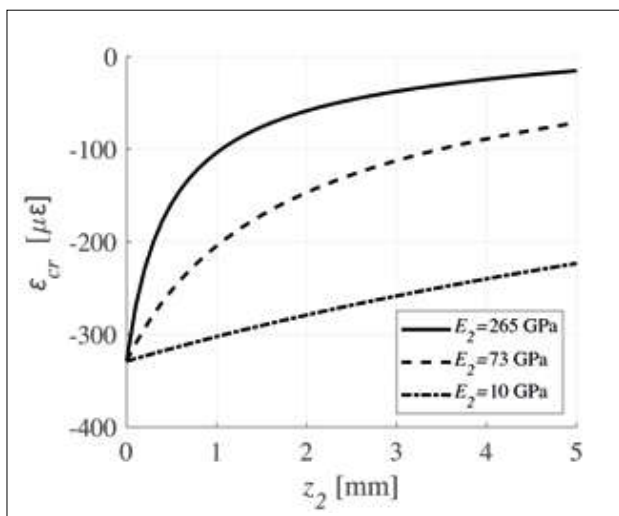
Ud fra sensitivitetsanalysen er det observeret, at den valgte tykkelse af armeringslaget, samt vedhæftningsevnen mellem asfalt og armering har stor betydning for resultatet. På Figur 2 ses et eksempel på, hvordan armeringstykkelser af et armeringsnet har en effekt på den kritiske træktøjning i bunden af asfaltlaget  $\epsilon_{cr}$  (antaget situation fra Figur 1 med fuld vedhæftning mellem lag). Figuren viser, hvordan den kritiske tøjning reduceres ved en forøgelse i armeringstykkelser. Når asfaltarmering på denne måde er modelleret som et tyndt lag, antages laget at være homogent. Omvendt er det reelle produkt formet som et net, altså derfor inhomogent. Dvs. at den faktiske tykkelse ikke kan bruges som input til modellen, men derimod bør repræsenteres som en "effektiv" modeltykkelse for korrekt at beregne en realistisk respons med en analytisk model. På Figur 3 ses nu, hvordan den kritiske tøjning  $\epsilon_{cr}$  ændrer sig som funktion af vedhæftningen mellem asfalt og armering,  $k_h$ . I dette tilfælde ses det netop, at når overførelsen af kræfter mellem armering og asfalt reduceres, øges den kritiske tøjning i bunden af asfaltlaget.

**Eksperimentelt arbejde**

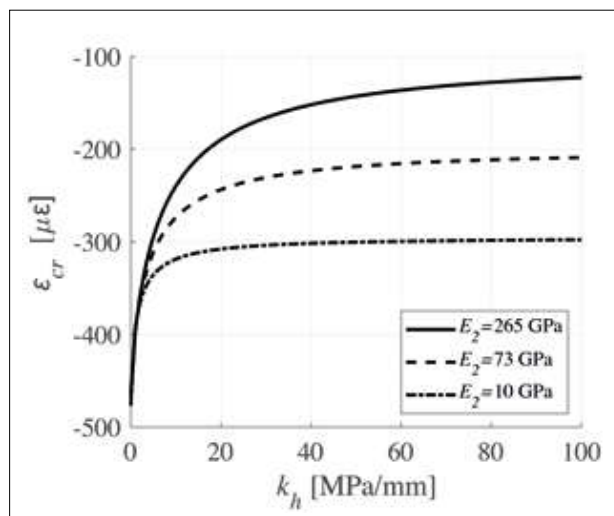
Ud fra de indledende sensitivitetsanalyser står det klart, at for at fremstille en reel belægningskonstruktion med en mekanisk model, er det nødvendigt at indsamle data fra virkelige målinger til at fastlægge parametre som f.eks. den effektive armeringstykkelser og vedhæftningsevnen (repræsenteret af  $k_h$ ) mellem armeringsnet og asfalt. Her er det tåltænkt at lave fuldskalaforsøg med fokus på at måle responsen af asfaltbelægninger med ar-



Figur 1: Koncepttegning af en lastet trelagsbelægning med integreret asfaltarmeringsnet.



Figur 2: Kritisk tøjning som funktion af den effektive armeringstykkelse, vist for tre armeringstilfælde (ækvivalent med kul-, glas- og polymer fiber) med forskellige E-modulværdier.



Figur 3: Kritisk tøjning som funktion af kraftoverførelseskoefficienten mellem armering og asfalt, vist for tre armeringstilfælde (ækvivalent med kul-, glas- og polymer fiber) med forskellige E-modulværdier. Armeringstykkelse er fastsat til  $z_2 = 1$  mm.

»

# FORÅRET ER PÅ VEJ

## VI UDFØRER ALLE FORMER FOR ASFALTARBEJDE



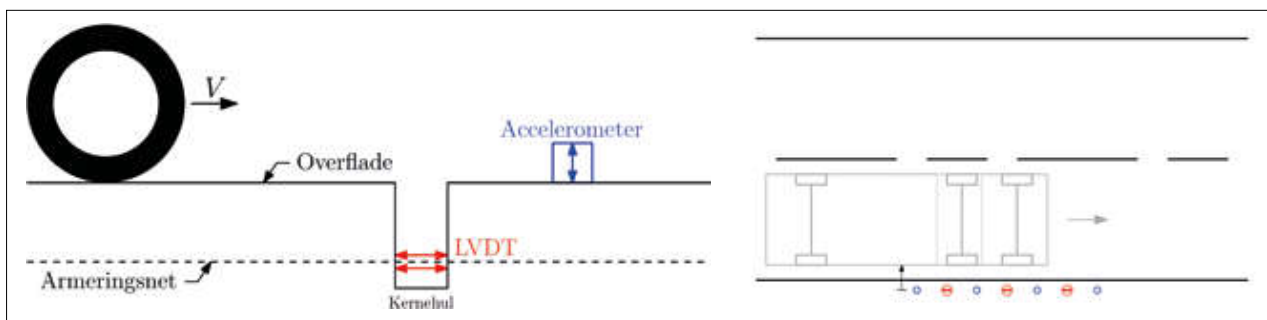
FÅ ET GODT TILBUD

[WWW.PANKAS.DK](http://WWW.PANKAS.DK)

BÆREDYGTIG ASFALT



Figur 4: Illustrationer fra tidligere forsøg med sensorer monteret på vejen. Fra venstre mod højre ses følgende: Accelerometer, LVDT og Raptor (testkøretøj).



Figur 5: Koncepttegning af sensorer monteret på vej med forbikørende køretøj.

mering, samt tilsvarende målinger fra før installation af armering. Responsen vil blive målt med nye, innovative metoder. Dette indebærer sensorer, der monteres på vejen, som måler belægningens opførsel fra forbipasserende, højlastede køretøjer med kendte akselvægte og hjulkonfiguration. Tidligere forsøg udført på DTU (se Figur 4) har vist, at sensorer som høj-sensitive accelerometere, samt afstandsmålere i form af LVDT'er (lineære variabel induktive transformatorer) kan benyttes til dette formål.

Et eksempel på sådan en opstilling kan ses på Figur 5, hvor et accelerometer er monteret på vejoverfladen og LVDT'er er installeret i et asfaltkernehul. I dette tilfælde er det også tiltænkt, at de to LVDT'er skal installeres på hver side af armeringsnettet, for på denne måde at kunne måle vedhæftningsevnen.

Herefter benyttes data fra sensorerne til at sammenligne med virtuelle sensordata. Med virtuel sensordata menes der, at den endelige udviklede mekaniske model bruges til at forudsige responsen af

en sensor udsat for laster fra et forbipasserende køretøj. Et virtuelt accelerometer kan modelleres ved først at udregne en tidsserie af vertikale flytninger på overfladen. Dette gøres ved at flytte lasten med en konstant hastighed  $V$  i forhold til sensorens position. Dernæst udregnes den vertikale acceleration af belægningsoverfladen ved at dobbeltdifferentiere flytningerne med hensyn til tiden. En virtuel LVDT kan på sin vis modelleres ved samme princip som for et accelerometer. Anderledes er dog, at det nu er den horisontale flytning, der benyttes fra modellen. Derudover er responsen søgt længere nede i belægningen (hvis man ønsker det som anvist på Figur 5). To tidsserier af den horisontale flytning udregnes, én for hver position af de to kontaktpunkter mellem LVDT og kernehul. Den virtuelle LVDT respons kan endeligt udregnes som forskellen mellem de to flytningstidsserier.

### Opsummering

Udviklingen af en computerbaseret beregningsmodel skal give vejingeniører og

eksperter bedre muligheder for at forstå og indarbejde armeringsprodukter i dimensionering af fleksible belægninger. Til dette formål vil mekaniske modelleringsskemaer blive anvendt til at forudsige vejbelægningens opførsel under belastning. Baseret på sensitivitetsskemaer med en traditionel mekanisk model, er det påvist at et armeringsnet kan inkluderes som et tyndt lag med en høj stivhed mellem asfaltlag. Det er observeret, at armeringslagets tykkelse, samt vedhæftningsevnen mellem asfalt og armering, har stor betydning for beregningsmodellens kritiske respons. Disse parametre er derfor tiltænkt at skulle undersøges vha. fuldskalaforsøg, baseret på eftermontering af forskellige typer sensorer i vejbelægningen til at analysere vejens respons under belastning af et forbipasserende køretøj. ●