

Design og dimensionering

Indhold

| | |
|--|-----------|
| Indledning | 2 |
| Vejkassen | 2 |
| Design af befæstelser | 3 |
| Designprocessen | 5 |
| Befæstelsestype | 10 |
| Funktionskrav | 14 |
| Hjultryk og kontaktryk | 16 |
| Trafikklasse og dimensioneringstrafik | 20 |
| Trafikklasse | 20 |
| Dimensioneringstrafikkens belastning | 20 |
| Underbund og frostfølsomhed | 25 |
| Underbundens bæreevne | 25 |
| Sikring mod frostfølsomhed | 26 |
| Materialeegenskaber og katalogbefæstelser | 28 |
| Materialeegenskaber | 28 |
| Katalogbefæstelser | 32 |
| Dimensionering af befæstelsens lag | 35 |
| Trykspredning | 36 |
| Projektering af detaljer | 44 |
| Bibliografi | 46 |

Indledning

Vejkassen

Vejkassen er vejkonstruktionens centrale del. Det er på vejkassen færdslen foregår; derfor er det afgørende, at vejkassen er opbygget, designet og vedligeholdt, så den kan betjene trafikken.

Veje, gader og stier indgår, samtidig med at de tjener som færdselsarealer, i et samspil med deres omgivelser. Vejkassens udformning skal derfor også tage hensyn hertil.

Opbygning

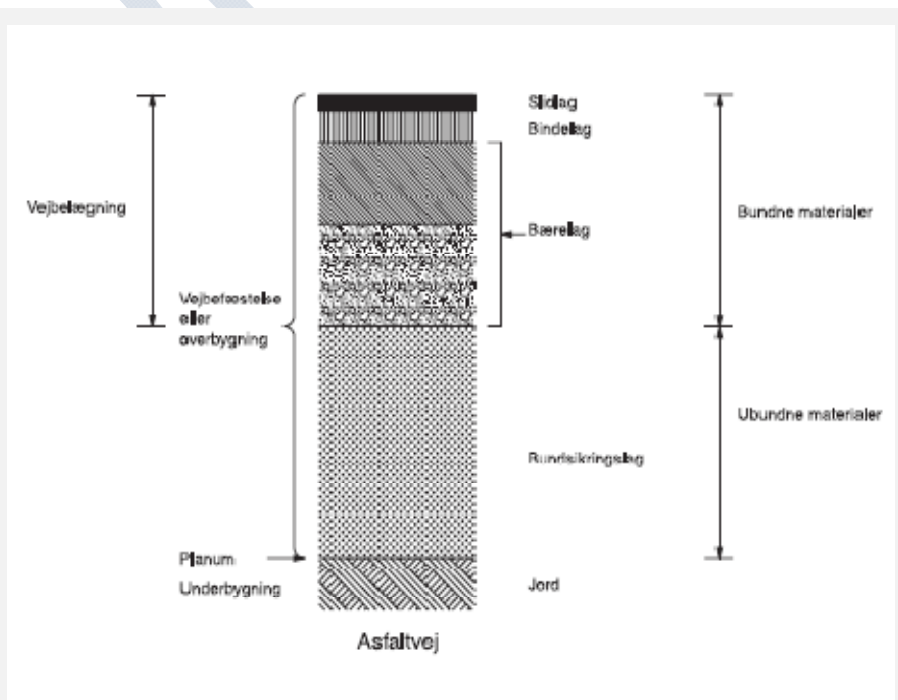
Vejkassen består, jævnfør Figur 1, af vejbefæstelsen og af den jord, som vejbefæstelsen hviler på.

Jorden, vejens **underbygning**, afgrænses af råjordsoverfladen, **planum**. Underbygningen er resultatet af en bearbejdning. Muld er afrømmet. Herefter er overskydende jord fjernet, hvor vejen ligger i afgravning, eller der er tilført mineralsk jord, som er komprimeret, hvor jorden ligger i påfyldning. Det øverste lag jord under planum kan eventuelt være bearbejdet med et stabiliseringsmiddel, fx kalk, for at forøge underbundens bæreevne.

Oven på vejkassen opbygges **vejbefæstelsen**, også benævnt vejens **overbygning**. Den består nederst af ubundne materialer, øverst af bundne, dvs. materialer, der holdes sammen af binde-midler. Lagene, der består af bundne materialer, betegnes vejbelægningen. Befæstelsen består af flere lag, der benævnes efter deres funktion.

Bundsikringslaget ligger mellem underbygningen og de egentlige bærelag i vejbefæstelsen. Det udføres, når hensynet til frostsikkerhed kræver det. Det medvirker også til at øge vejbefæstelsens samlede bæreevne. Herudover virker bundsikringslaget som et fladedræn, der bortleder eventuelt vand, som er trængt ind i befæstelsen.

Belægning er betegnelsen for alle de lag, der ligger over vejbefæstelsens bundsikringslag, eller direkte på planum, hvis bundsikringslaget ikke forefindes.



Figur 1. Princip i opbygningen af en asfaltvej, dvs. en vej, hvor belægningens øverste lag materialemæssigt består af bitumenbundne materialer, normalt ét eller flere bærelag og øverst ét slidlag. Fra (1).

Belægningen benævnes ofte efter det øverst udlagte lag, fx asfaltbelægning, betonbelægning etc., selv om belægningen består af flere lag af forskellige materialetyper.

De nederste lag i belægningen kaldes **bærelag**. Deres hovedfunktion er at give vejbefæstelsen den fornødne bæreevne. Det sikres ved at fordele belastningerne fra trafikken på en sådan måde, at der fra vejoverfladen og ned til underbunden ikke opstår spændinger og tøjninger, der medfører skadelige deformationer og sætninger i befæstelsens enkelte lag eller i underbunden.

Der vil ofte være flere bærelag. Det nederste er typisk *stabilt grus* eller *macadam*, altså et ubundet lag, mens de øvre bærelag er bundne.

Bindelag indskydes eventuelt mellem bærelagene og det afsluttende slidlag i en asfaltbelægning. Bindelagets formål er, som navnet siger, at sikre god vedhæftning mellem de to lag. Bindelaget bidrager endvidere til bærelagernes funktion.

Det øverste lag, **slidlaget**, udgør vejoverfladen. Det er det lag trafikanterne ser og færdes på. Dets hovedopgaver er at sikre de ønskede overfladeegenskaber, som vejen skal have med hensyn til friktion, kørselskomfort, afvanding, tæthed, slidstyrke, holdbarhed, lysrefleksion mv. Visse slidlagstyper, men ikke alle, bidrager endvidere til bærelagernes funktion.

Princippet i opbygningen er udtryk for en teknisk-økonomisk imødekomme af modsatrettede hensyn. Dels naturligvis kravet om at opnå en funktionelt og strukturelt duelig konstruktion, således at vejoverfladen kan bruges til færdsel, og således at den kan holde til, at færdslen finder sted. Dels respekt for de anlægstekniske metoder, der er til rådighed fx i form af materiel til at producere belægningsmaterialer og udlægge dem – noget der især kan spille en rolle ved arbejder i udlandet. Dels hensyn til hvilke egnede materialer, der er tilgængelige til produktionen, og til en fornuftig råstofhusholdning med disse materialer. Dels hensyn til økonomien, der er knyttet til at bygge vejbefæstelsen og til efterfølgende at vedligeholde den i vejens levetid.

Der er tale om afvejninger, og der er tale om at inddrage lokale forhold.

Design af befæstelser

Det er en udfordring at designe vejbelægninger, der indfrier de funktionskrav, der (jævnfør efterfølgende kapitel) stilles til vejbefæstelsen. Det er også en udfordring at designe og producere belægningsmaterialer, der stabilt lever op til kravene.

Navnlig to forhold skal tages i betragtning: Variationerne knyttet til underbunden henholdsvis til materialerne.

Designet af en vejs befæstelse er derfor i mindre grad en designopgave end et valg blandt rimeligt standardiserede belægningstyper, der er tilgængelige, samt en dimensionering for den valgte befæstelse.

Underbundens variationer

Jorden, som udgør vejbefæstelsens underbygning, har ikke ensartede egenskaber, hverken ned gennem et lodret snit, på langs ad vejens tracé eller over tid.

Det er velkendt, at de enkelte jordaflejringer har forskellige egenskaber, og at aflejringernes tykkelse varierer. Nogle jordarter har bedre bæreevne end andre. Nogle jordarter opsuger meget vand og kan være frostfølsomme.

Ved design af befæstelserne inddeles vejtracéet i delstrækninger, hvis underbygning hver for sig har nogenlunde de samme bæreevneegenskaber. Delstrækningerne skal have passende store længder af hensyn til styringen, når befæstelsens overbygning opbygges.

Inddelingen indebærer, at underbygningen sine steder må forbedres, så svagheder, der optræder lokalt, bliver afhjulpet. Det kan være mindre forekomster af blød bund, der må udskiftes.

Figur 2. Køretøj på udenlandsk vej, der har problemer med bæreevnen og med afledningen af vand. Ukendt fotograf.



Er der tale om lange passager over blød bund med stor mægtighed, er det ikke realistisk at udskifte jordlaget; i stedet må man ty til dræning, forkomprimering og fundering fx gennem udlægning af en gruspude, der »flyder« på den bløde bund, og som derved kan bære overbygningen. Sådanne tiltag behandles i faget geoteknik.

Et særligt forhold gælder frostfølsomme jordarter. De bør ikke forekomme over frostsikker dybde. Frostfølsomheden beror på, at jordarten rummer vand. Når jorden fryser, kan vandet danne islinser. Islinserne fortrænger jordmineralelementerne. Når jorden derfor atter tør, efterlader islinserne hulrum i jorden. Disse hulrum svækker jordlagets styrke, således at underbygningen ikke kan optage belastningerne fra trafikken. Overbygningen skal altså i så fald selv bære hele trafiklasten, og i det omfang den ikke kan det, er der risiko for, at den går itu, jævnfør Figur 2.

Trafikministeren har, jævnfør færdselsloven¹, mulighed for at indføre tøjbrudsrestriktioner, hvor der er problemer med frostfølsom jord i vejenes underbund. Bestemmelsen er efterhånden sjældent anvendt, men den betyder, at der i foråret, navnlig efter hårde vintre, kan nedlægges forbud mod at færdes med tunge køretøjer på sådanne veje.

Materialernes variationer

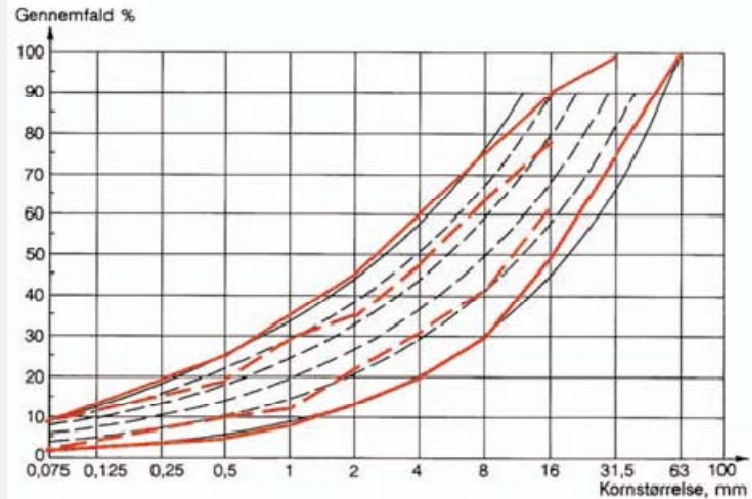
Ikke kun underbunden varierer. Der er også forskelle i de materialer, som anvendes i vejenes belægningslag.

Forskelle optræder i det skelet af sten-, grus- og sandkorn, der udgør hovedparten af belægningslagene. Det kan for det første være forskellige bjergarter, der indgår, og bjergarterne kan i sig selv tilføre belægningen meget forskellig styrke og holdbarhed. Derfor er der opmærksomhed på materialernes herkomst.

For det andet spiller det en rolle, hvordan materialernes kornstørrelse fordeler sig. Kornene skal helst pakke sig, så mindre korn udfylder hulrummene mellem de store, og således at hulrummene mellem de mindre fyldes af endnu mindre korn. Herved opnås, at kornene bedst muligt overfører belastningen mellem sig. Dette hensyn sikres, ved at kræve, at materialernes korn-

¹ § 94. Trafikministeren kan i tøjbrudsperioder eller under lignende særlige forhold, hvor vejene skønnes særlig udsat for beskadigelser, midlertidigt forbyde færdsel med køretøjer, hvis faktiske totalvægt eller akseltryk overstiger en vis grænse, eller begrænse den tilladte kørehastighed for sådanne køretøjer. (11)

Figur 3. Røde linjer er kornkurvekrav efter nye udbuds- og anlægfsforskrifter for stabilt grus I – sorte linjer er kornkurvekrav efter hidtidige udbuds- og anlægfsforskrifter. Gradering skal overalt være inden for fuldt optrukne røde linjer. Producenten skal deklarere værdier inden for et snævre interval, som tilgodeser de fastsatte produktionstolerancer – stiplede røde linjer. 90 % af kornkurverne fra produktionskontrollen skal overholde de deklarede værdier inklusive tolerancer inden for en produktionsperiode på maksimum 6 måneder
Fra (2).



kurve er passende graderet, jævnfør Figur 3. Bestemmelser om kornkurver var tidligere fastsat gennem de nationale standarder, i Danmark DS 401, men er nu omfattet af fælleseuropæiske produktstandarder.¹

Også i de bindemidler, der holder de bundne belægningslag sammen, er der variationer. Det gælder ikke mindst i bitumen, bindemidlet i de asfaltbelægningslag, der er altdominerende på de danske veje.

Bitumen er et organisk materiale. Det forekommer i naturen, blandt andet anvendte man i de sumeriske bycivilisationer (5-3000 før vor tidsregning) naturbitumen som klæbe- og fugemasse i mosaikker og bygninger. Den bitumen, der anvendes i dag, er fremstillet af produkter fra olieindustrien. Der er ikke tale om ét veldefineret produkt, men om at blande destillationsrester bestående af højmolekylære kulbrinter. De materialer, der blandes, er forskellige, og produktets egenskaber er tilsvarende forskellige, om end den enkelte bitumenfabrikant sikrer ensartethed i sit produkt gennem løbende kontrol med råvarer og fremstillingsproces.

Bitumen er termoplastisk. Det betyder blandt andet, at materialeegenskaberne ændrer sig med temperaturen. En følge heraf er, at bitumenbundne belægningslag til en vis grad kan regenerere, når de bliver opvarmet, fx om sommeren. Man kan altså komme ud for, at materialet så at sige selv reparerer fine revner.

De kulbrinter, bitumen består af, er ikke alle stabile. Der vil med tiden, og under påvirkning af temperatur og belastning samt i reaktion med luften, ske nedbrydninger og omlejninger i kulbrintekæderne. Herved ændrer materialet egenskaber. Det betyder, at den kunstige bitumen ikke bevarer sine egenskaber. Det kan miste noget af sin klæbeevne, og det kan blive mere sprødt. Disse ændringer sætter en grænse, for hvor længe en asfaltbelægning kan leve.

Designprocessen

Den designproces, dette notat beskriver, følger principperne i de danske vejregler for dimensionering af forstærkningsbelægningslag (3). Processen er skitseret på Figur 4.

¹ For stabilt grus og bundsikring til vejbygningsformål gælder »DS/EN 13285 Vejmaterialer – ubundne blandinger – specifikationer« og »DS/EN 13242 Tilslag til ubundne og hydraulisk bundne materialer til vejbygning og andre anlægsarbejder«.

Figur 4. Designprocessen. De grå kasser kan eventuelt udelades ved mindre og mindre betydende anlæg.



Belægningstype og funktionskrav

Første trin er altid at fastlægge belægningstypen og de funktionskrav, befæstelsen skal indfri. Blandt funktionskravene er befæstelsens levetid.

Når belægningstype og funktionskrav er fastlagt, kan vejbefæstelsen dimensioneres. Dimensioneringen resulterer i at man ved, hvor tykke de enkelte lag skal være, og hvilke materialer, de skal bestå af, herunder hvilke materialeparametre, de har. Denne procedure er antydnet i Figur 5.

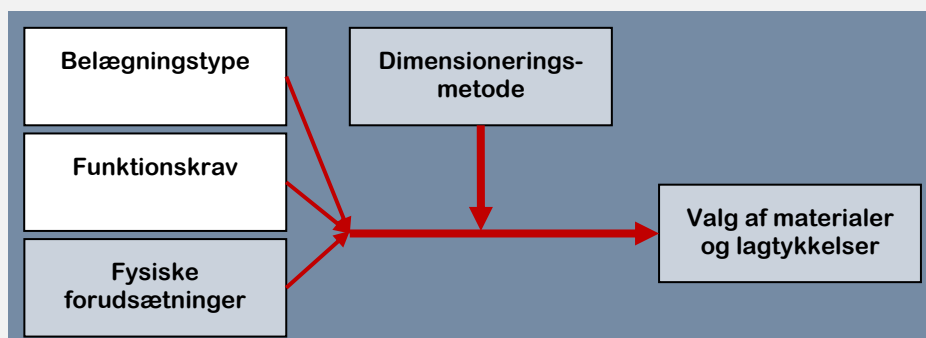
Trafikklasse og dimensioneringstrafik

De fysiske forudsætninger er først og fremmest trafikens sammensætning og størrelse. Det er navnlig den tunge trafik, der er interessant her. Der er derfor en opgave i at estimere eller prognosticere en værdi for et udtryk, der beskriver den tunge trafik, som befæstelsen bliver belastet af gennem sin levetid.

Blandt de øvrige fysiske forudsætninger indgår kendskab til de klimatiske påvirkninger såsom frost, nedbør og temperatur, som vejbefæstelsen skal virke under. Disse påvirkninger og deres variation beror på de aktuelle forhold. Inden for et mindre geografisk område vil de være indarbejdet i dimensioneringsmetoderne; eksempelvis er de dimensioneringsmetoder, de danske vejregler (3) angiver, afstemt, så de gælder danske forhold.

Valg, dimensionering og optimering af befæstelse

Valg af dimensioneringsmetode burde i princippet ikke - men kan i praksis - påvirke vejbefæstelsens udformning. Dette skyldes, at der er flere dimensioneringsmetoder til rådighed, der bygger på hver sit erfaringsgrundlag, og som har sine indbyrdes afvigende teoretiske forudsætninger.



Figur 5. Dimensioneringsmetoden som et led mellem belægningstype, funktionskrav, forudsætninger og udformning

Katalogmetoden

I første omgang bestemmes en trafikklasse for vejstrækningen og på grundlag heraf vælges princippet i befæstelsesopbygningen. Dette svarer til benytte vejreglens katalogmetode.

Katalogmetoden forudsætter, at de materialer, der er til rådighed til at opbygge vejbefæstelsen af, har standardiserede materialeegenskaber.

Metoden forudsætter endvidere en grov klassifikation af underbundens egenskaber, navnlig om den er »frostfølsom«, »frosttvivlsom« eller »frostsikker«. Hører den til en af de to førstnævnte grupper, skal det sikres, at befæstelsen får en tykkelse, så underbunden ikke påvirkes af frost. Det kan indebære, at den samlede befæstelses tykkelse skal forøges ud over hvad katalogmetoden anviser.

Baggrunden er, som nævnt, risikoen for at der dannes islinser og sker frosthævning. Hertil kommer at omfanget af den tunge trafik har indflydelse på risikoen for frostskafer.

Analytisk-empirisk dimensionering

Ved mindre og mindre betydende anlæg og ved dimensionering af brostensbelægninger kan selve dimensioneringen stoppe her. Ved mellemstore og større anlæg vil der altid ske en mere detaljeret dimensionering. Herved opnås en bedre anlægsøkonomi, ligesom der holdes bedre hus med råstofferne.

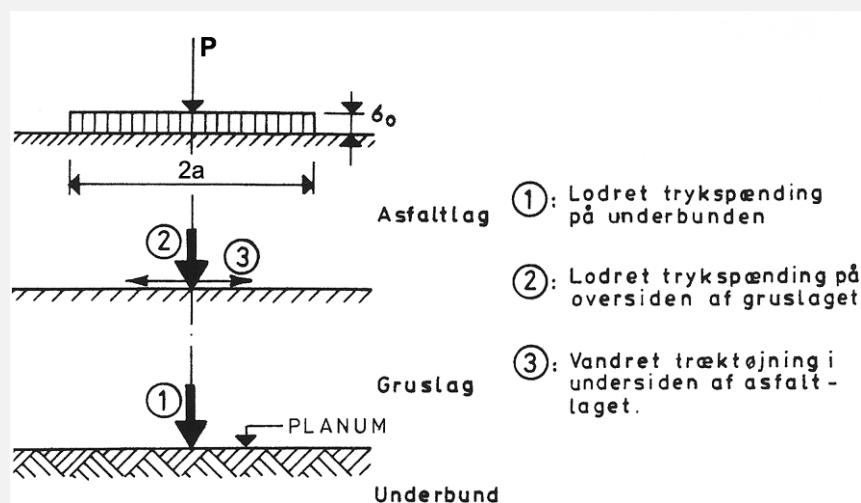
Den metode, der anvendes i Danmark kaldes analytisk-empirisk dimensionering. Navnet skyldes, at de påvirkninger, som befæstelseslagene udsættes for, beregnes efter en analytisk model, der hviler på elasticitetsteorien, mens metoden anvender empirisk underbyggede modeller til at fastlægge, hvor store påvirkninger, lagene kan holde til.

Ved metoden fastlægges den dimensioneringsbelastning, trafikken giver over belægningens levetid, og på grundlag af denne dimensioneres vejbefæstelsens enkelte lag.

Metoden forudsætter, at der kendes materialeparametre, E og ν , for de enkelte lag i befæstelsen og for underbunden. Den første parametrene er E -værdien [MPa], der er et udtryk for de pågældende materiales elastiske egenskaber. Kun de færreste belægningsmaterialer er rent elastiske, og man kan derfor ikke anvende ordet elasticitetskoefficient. E -værdien angiver forhold mellem spændinger, σ [MPa] og tøjninger, ε [-] i materialet: $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Den anden parameter er Poissons¹ forhold, ν , der angiver forholdet mellem tøjninger i længde og i tværetningen.

De dimensioneringskriterier, der lægges til grund, er normalt, jævnfør Figur 6:

Figur 6. Dimensionsgivende belastning og dimensioneringskriterier. Det dimensionsgivende hjultryk er betegnet ved P . Det tilsvarende maksimale kontaktryk, som dækket påvirker vejoverfladen med, betegnes ved σ_0 . Der forudsættes normalt et cirkulært kontaktareal med radius a .



¹ Siméon Denis Poisson (1781-1840), fransk matematiker og fysiker.

- Lodret trykspænding på underbundens overside (planum)
- Lodret trykspænding på de enkelte ubundne lag
- Vandret tøjning i undersiden af asfaltlaget
- Frostsikkerhed

Dimensioneringsmetoden behandles mere uddybende nedenfor. I hovedtræk går den ud på at man lag for lag beregner tilladelige og aktuelle spændinger og tøjninger, idet man justerer lagtykkelser og lagenes materialeparametre, så man sikrer sig, at det enkelte lag kan holde.

Størrelsen af den **tilladelige lodrette trykspænding** på planum afhænger af underbundens E_m -værdi, samt af det akkumulerede trafiklast.

Den **aktuelle lodrette trykspændings** størrelse oven på planum er afhængig af størrelsen af det dimensionsgivende hjultryk og dets trykfordeling på vejoverfladen, samt af den overliggende vejbefæstelses trykfordelende evne. Denne trykfordeling afhænger af vejbefæstelsens samlede lagtykkelse, samt – da vejbefæstelsen er lagdelt – også af de enkelte lags tykkelser og forskellige materialeegenskaber (E -værdier).

Størrelsen af den **tilladelige lodrette trykspænding** ovenpå det enkelte bærelag afhænger af lagets E -værdi og som for planum af den akkumulerede trafiklast.

Størrelsen af den **aktuelle lodrette trykspænding** på oversiden af et bærelag bestemmes – som for trykket oven på planum – af det dimensionsgivende hjultryk og kontaktryk, samt primært af de overliggende lags samlede tykkelse og sekundært af de enkelte bærelags tykkelsers og E -værdier.

Som følge af asfaltbærelagets delvise bøjningsstivhed – og dermed momentpåvirkning – opstår der bøjningstrækspændinger i lagets underside. Disse bevirker såvel elastiske som plastiske træktøjninger. Den **tilladelige tøjnings** størrelse fastlægges på grundlag af den akkumulerede trafiklasts størrelse, og af asfaltmaterialets egenskaber, hvor især bitumenindholdet er afgørende.

Den **aktuelle bøjningstræktøjning** beregnes som de aktuelle spændinger på grundlag af elasticitetsteoretiske forudsætninger og formler. Hvorvidt den aktuelle tøjning overskrider den tilladelige tøjning, vil herefter afhænge af det dimensionsgivende hjultryk og kontaktryk, samt af asfaltlagets tykkelse og E -værdier.

For at opnå **tilstrækkelig frostsikkerhed**, er det endelig nødvendigt at fastsætte en minimumstykkelse for den samlede befæstelse.

Den analytisk-empiriske metode er udviklet til fleksible, til halvstive og til stive befæstelser; men ikke til befæstelser bestående af brolægningsten. Notatet beskriver de beregninger, der skal udføres, men det bemærkes, at beregningerne i dag i praksis kan foretages ved brug af et computerprogram, MMOPP (*Mathematical Modeling Of Pavement Performance*) ud fra nogle prædefinerede eller brugervalgte trafik- og materialeparametre.¹ (4)

Dimensionering ved simulering

Ved større anlæg med fleksible befæstelser bør designprocessen herefter indeholde en optimering baseret på en computersimulering.² Simuleringen sker med førnævnte program, MMOPP, og den har navnlig tre mål.

¹ Programmet kan downloades fra Internetsiden www.vejregler.dk → Veje.

² Simuleringsmetoden behandles ikke i dette notat; der henvises i stedet til vejreglerne (6) og til brugervejledningen for MMOPP (7). Det bemærkes, at MMOPP kun tillader simulering for fleksible befæstelser.

Dels inddrager simuleringen de variationer, der må antages at forekomme i trafikbelastningen og i materialeparametrene. Variationerne forekommer såvel over det enkelte år, som (for så vidt angår materialeparametrene) over vejstrækningen.

Dels inddrager simuleringen andre levetidskriterier end befæstelseslagernes bæreevne, sådan som denne vurderes ved den »almindelige« analytisk-empiriske dimensioneringsmetode..

Dels giver simuleringen mulighed for at optimere anlægskostningerne.

Bearbejdning af detaljer

Sidste trin i designprocessen er bearbejdningen af befæstelsens detaljer. Det sker i forbindelse med udarbejdelsen af udbudsmaterialet.

Valg af dimensioneringsmetode

Et vejanlægs klasse og omfang er normalt bestemmende for valg af vejbefæstelsens type og for den nøjagtighed, hvormed man ønsker vejbefæstelsen dimensioneret. Det er derfor anset for rimeligt, at vejreglerne angiver forskellige dimensioneringsmetoder, der kan anvendes afhængigt af anlæggenes betydning og omfang. De danske vejregler (3) opererer med følgende grove inddeling:

- større anlæg,
- mellemstore anlæg,
- mindre og mindre betydende anlæg

For den første gruppe, dvs. større anlæg, bør vejbefæstelsen dimensioneres både efter den analytisk-empiriske metode og simulationsmetoden. Ved mellemstore anlæg kan dimensioneringen foretages ved anvendelse af enten det analytisk-empiriske dimensioneringsprogram eller simulationsmetoden. Ved mindre anlæg og mindre betydende anlæg foretages normalt ingen egentlig dimensionering. For denne gruppe, hvor man i mange tilfælde mangler grundige forundersøgelser, kan befæstelsen »dimensioneres« ved udvælgelse fra et standardkatalog.

De tre dimensioneringsmetoder, katalogmetoden, den analytisk-empiriske metode og simulationsmetoden kan imidlertid ligeså naturligt knyttes til forskellige stader i projekteringsforløbet.

Tidligt i processen, når der udarbejdes forslag til vejtracéet og under skitseprojekteringen, kendes underbundens geotekniske egenskaber ikke præcist; i de første faser vil de oplysninger, der er tilgængelige alene stamme fra den almindeligt tilgængelige geologiske kortlægning af landskabet. I disse faser kan en dimensionering baseret på katalogmetoden være tilstrækkelig god. En af de parametre, der skal fastlægges, er koblingshøjden, altså afstanden fra råjordsplanum til belægningsoverflade, således at der kan gennemføres jordberegninger med jordbalance.

Senest når linjeføringen er fastlagt, vil det være naturligt at sikre sig oplysninger om de faktiske geologiske og geotekniske forhold. Herved skabes også grundlag for en mere detaljeret dimensionering af befæstelsen, herunder for at finde en teknisk-økonomisk fornuftig opbygning.

Bemærk, at alle tre metoder forudsætter, at udbudsmateriale udfærdiges i overensstemmelse med vejreglernes udbuds- og anlægsskrifter, samt at god anlægsteknisk praksis følges ved udlægning af de enkelte lag.

Befæstelsestype

Den type vejoverflade, der ønskes, er afgørende for dimensioneringen. Valget kan være mere eller mindre bundet.

Bindingerne optræder især i byrum, hvor æstetiske hensyn kan diktere valget, enten fordi belægningerne skal følge allerede valgte standarder, eller fordi belægningen skal bidrage til det visuelle signal, man ønsker fra fx en pladsdannelse.

Uden for de centrale bykerner og i det åbne land er bindingerne oftest langt mindre, og den projekterende kan i reglen »nøjes« med at tilgodese funktionskravene.

Befæstelsesmaterialer

Vej- og trafikfaget har sin egen fagterminologi. En forudsætning for at håndtere opgaverne, der er knyttet til design og dimensionering af vejbefæstelser, er kendskab til denne terminologi. Grundlæggende definitioner findes i *Vej- og trafikteknisk ordbog* (1).

Vejbefæstelsens **bundne lag**, altså de lag, hvor de anvendte materialer er sammenbundne af bindemidler, deles normalt i tre grupper:

- **bitumenbundne materialer**, der består af naturligt forekommende eller kunstigt fremstillede stenmaterialer, eventuelt tilsat filler¹ og iblandet bitumen, herunder specialbitumen
- **cementbundne materialer**, der består af naturligt forekommende grusmaterialer iblandet cement
- **kalkstabiliserede materialer**, der består af naturligt aflejrede lermaterialer iblandet brændt kalk eller hydratkalk

Blandt vejbelægningens **bundne lag** skelnes tilsvarende mellem:

- **fleksible vejbelægninger**, dvs. belægninger bestående af et bærelag af makadam² eller stabilt grus og afsluttet med asfaltlag med en bitumen med høj penetration
- **halvstive vejbelægninger**, dvs. belægning bestående af et bærelag af stabiliserede materialer med fx cement, kalk eller bitumen og afsluttet med et asfaltlag
- **stive vejbelægninger**, dvs. vejbelægning bestående af et lag af stenmaterialer, der er hydraulisk bundne, normalt med cement
- **semifleksible vejbelægninger**, dvs. vejbelægning bestående af et åbent asfaltskelet – normalt udført af drænasfalt – og en cementmørtel, der udfylder alle hulrum i vejbelægningen fuldstændigt

Valg af belægningstype

Valget blandt belægningstyper, indebærer afvejning af de funktionskrav, der stilles til vejbefæstelsen.

Belægninger til den kørende trafik

På den kørende motortrafiks almindelige færdselsarealer bruges normalt bundne belægninger, i Danmark i reglen asfaltbelægninger. De giver en jævn og komfortabel overflade.

¹ Filler er fint materiale, som bruges til at tilsætte en kornet blanding for at opfylde dens klassificering; inden for vejteknikken er det betegnelsen for den del af et mineralsk materiale, der passerer en sigte med maskevidde 0,063 mm.

² Makadam betegner et ubundne bærelag, der fremstilles af enskornede sten, som forkiles ved tromling, hvorefter mellemrummene mellem stenene udfyldes med dækgrus. Der skelnes mellem bundstensmakadam (sortering 63/125 mm), singelsmakadam (sortering 31,5/63 mm) og skærvemakadam.

Der er flere typer asfalt. Valget mellem typerne er en afvejning af økonomi og holdbarhed, naturligvis med hensyntagen til trafikken størrelse og sammensætning. Særlige forhold kan spille ind, fx ønske om visse lystechniske egenskaber, eller om støjsvag belægning på trafikveje ved boligområder.

Hvor belægningen skal være med til at signalere »bycenter«, kan det være aktuelt at bruge brolægning, ofte i form brosten eller chaussésten af granit.

Belægninger for holdende køretøjer

Busstoppesteder og lignende har typisk samme (asfalt-)belægning som de omkringliggende kørebanearealer. Hvor trafikken er tung og hyppig, dimensioneres arealet særskilt.

I stedet for asfalt kan anvendes brolægning enten af bro- eller chaussésten eller af særlige belægningssten. Det gælder også, hvis der er behov for at markere stoppestedet visuelt, og hvor belægningen skal være holdbar over for oliespild.

Parkeringspladser udføres i asfalt, brolægning eller grus.

Belægninger på cykel- og fællestier

Cyklister vil i reglen foretrække at køre på en veludført, jævn asfaltbelægning uden løse stenmaterialer, og med en rimeligt lille maksimal kornstørrelse. Flint og tilsvarende spidse belægningssten bør ikke anvendes.

Hvor cyklister og gående færdes på samme areal, må hensynene afvejes – en ubunden belægning, fx stenmel, kan være et rimeligt kompromis.

Ekvipager (hest med rytter) skal normalt færdes på kørebanen. Hvor ridning tillades på stier, er det nødvendigt at tage særskilt hensyn hertil. Grus- og asfaltstibelægning vil ellers hurtigt bære præg af denne trafik.

Stier, der vintervedligeholdes, skal være dimensioneret til at bære det nødvendige materiel.

Belægninger for gående

Gågader

Gågader formes med hensyntagen til de gående, men skal normalt dimensioneres for ærindekørsel, fx i forbindelse med vareleverancer. Resultatet er ofte, at gågaden får en brolægning i fliser eller evt. i chaussésten.



Figur 7. Torve- og gådabelægning fra Amagertorv i København. Færdelsesarealet danner et geometrisk mønster af tilskårne natursten i tre farver.
Foto fra Google.dk.

Gågader er sjældent rummelige nok til at give plads til et egentligt og markant belægningsmønster. Brolægningens regelmæssige forbandt har en væsentlig opgave med at sammenkitte de forskellige omgivelser til en visuel helhed.

Der kan dog være behov for at lade belægningen give signal om brugen af forskellige dele af tværprofilet: arealer til ærindekørsel, arealer til standsning i forbindelse med af- og pålæsning af varer, arealer til evt. udstillinger, arealer til cykelruter gennem gågaderne, mv. Sådanne behov kan tilgodeses ved at variere belægningsmateriale og/eller farve inden for afstemte rammer.

Pladser og torve

I modsætning til gågaderne tåler byens store rum, torvene og pladserne, ofte, at der arbejdes med et mønster i belægningen, se fx Figur 7.

Det er dog afgørende, at belægningens materialer og udførelse har en kvalitet, der kan understrege pladskaracteren.

Fortove

Byfortove beregnet for gående vil typisk være brolagt med fliser eller klinker.

Fliseudvalget er stort, hvad angår dimensioner, tykkelse, farver, overfladestentilslag, kantfasning, former, mv. Granitbelægninger, fx chaussésten, ses navnlig i »bycenter«-områder. Egentlige brostensbelægninger bør være forsynet med gangbaner af 2 evt. 3 bordursten af hensyn til kørestolsbrugere og andre bevægelsehandicappede.

I yderområder er grusfortove ikke unormale.

Mange byer har sine faste profiler, der navnlig viser sig i fortovsarealerne. Prøv at gøre iagttagelser om følgende:

- Er fortove udført i grus, i klinker (farve?), fliser (farve? størrelse?) eller i anden belægningsten?
- Er fortovsflisernes rækker fortovsfliser indbyrdes forskudt, eller ligger tværfugerne i forlængelse af hinanden?
- Er to rækker fortovsfliser adskilt af en række chaussésten, eller ligger de klos mod hinanden?
- Ligger der en række chaussésten mellem fortovsfliser og kantsten, eller en asfaltrabat, eller noget helt tredje?
- Trækkes fliserækken rundt langs kantstenen ved buslommer og lignende, eller tilskæres parallelt løbene fliserækker sådanne steder?
- Er der beton- eller chaussékantsten? og hvilken farve har de?

Udformning af nye belægninger bør respektere det lokale præg, medmindre det et konkret sted bevidst er valgt at fravige det.

Faldunderlag

Legeredskaber er berigende elementer i mange gademiljøer. Hvor der står legeredskaber, bør man imidlertid sikre sig, at de omkringliggende belægninger er faldegnede. Perlesten, grovsand og barkflis giver gode faldunderlag, men er naturligvis ikke egnede for almindelig færdsel. Et muligt kompromis kan være at anvende særlige fliser med gummigranulat.

Lagerhold

Vejbestyrelsen vil altid skulle sikre sig et mindre restlager af de belægningssten mv., der bliver brugt. De bliver gemt til reparationer. Jo mere speciel en belægning, der er valgt, des vigtigere er

det at sikre sig et restlager: Det er næsten umuligt at ramme samme farvenuance, samme sammensætning af overfladesten, samme dimensioner, mv.

Lagerhold koster plads og kapital. Derfor er de fleste vejbestyrelser interesserede i at mindske antallet af forskellige belægningsprodukter, man anvender, til det absolut mindste.

Renoveringer bør respektere dette forhold. Det skal være et bevidst tilvalg, hvis man indfører en ny type belægningssten hos en vejbestyrelse.

UDKAST

Funktionskrav

De krav, der stilles til en vejbefæstelse, opregnes i reglen under to overskrifter: Overfladeegenskaber (funktionelle egenskaber) og holdbarhed (strukturelle egenskaber). Det er underforstået, at befæstelsen også skal være økonomisk attraktiv.

Blandt overfladeegenskaberne er:

- at vejoverfladen skal være jævn, så færdslen bliver komfortabel
- at vejoverfladen skal have ru tekstur, så den yder god friktion
- at vejoverfladen skal være glat tekstur, så den ikke støjer
- at vejoverfladen skal være plan, så trafikanterne ikke glider af
- at vejoverfladen skal hælde, så vand kan rende af
- at vejoverfladen skal tæt, så den hindrer nedtrængning af vand
- at vejoverfladen skal være slidfast over for færdslens påvirkninger
- at vejoverfladen skal kunne modstå påvirkning fra spildte eller udsprede kemiske stoffer, fx oliespild og glatførebekæmpelsesmidler
- at vejoverfladen skal kunne renholdes, herunder tåle fejning og snerydning
- at vejoverfladen skal danne baggrund for kørebaneafmærkningen
- at vejoverfladen skal signalere færdselsarealets funktion
- at vejoverfladen skal skabe sammenfatning i færdselsbilledet
- at vejoverfladen skal byde på variation og harmoni

Nogle af kravene er åbenlyst modstridende. De må afvejes. Det varierer, hvor tungt de enkelte krav skal vægtes. Vægtningen afhænger af vejens funktion og trafikens sammensætning. Kravene til overfladeegenskaberne skal altså fastlægges med tanke på den brug, vejen skal tjene, og befæstelsen skal designes med sigte herpå.

I det omfang, vejoverfladen ikke længere lever op til de overfladeegenskaber, der er brug for, bør manglerne afhjælpes. Nogle funktionelle egenskaber er vitale, fx at der er acceptabel friktion. Vejoverfladen må betragtes som udtjent, hvis dette ikke længere er tilfældet. Andre egenskaber kan man måske vælge at gå på akkord med, måske på bekostning af vejbefæstelsens levetid.

Blandt de strukturelle egenskaber til vejbefæstelsen er:

- at befæstelsen skal fordele trafikens lodrette kræfter
- at befæstelsen skal optage trafikens drejende kræfter

Figur 8. Lange sammenhængende revner på langs eller tværs af vejen skyldes oftest mangelfuld bæreevne eller frost/tø-påvirkninger. Andre årsager kan være sætninger efter opgravninger, indvirkning af rødder fra vegetation langs vejen eller at revner fra en stift bærelag slår igennem.

Er der tale om langsgående revner 0 – 1 m fra kørebane kanten, kan årsagen være opblødning af underliggende lag, manglende sidestøtte, forskellige bæreevner ved sideudvidelser.

Foto fra (5).



Figur 9. Sporkøring er typisk 2 parallelle, langsdybninger i vejoverfladen hidrørende fra trafikken. Sporkøring ses bedst under eller efter regnvej. Dybden måles ved nedstik fra en 2 m lang retskede til det dybeste punkt.

Selv om sporkøring viser sig i vejoverfladen, kan skaden ligge i et underliggende lag.

Sporkøring skyldes ofte mangelfuld bæreevne, sidestøtte, afvanding eller efterkomprimering. Hertil kommer instabilitet i asfaltlag. En anden årsag kan være, at trafikbelastningen er steget væsentligt i forhold til det slid, der var forudsat ved dimensioneringen.

Foto fra (5).



- at befæstelsen skal være stabil, så der ikke opstår deformationer i vejoverfladen
- at befæstelsen skal kunne modstå påvirkninger fra klimaet, navnlig temperatursvingninger og nedbør
- at befæstelsen skal kunne opbrydes og retableres uden tab i forannævnte kvaliteter, når der skal skabes adgang til de ledninger, der ligger under belægningen
- at belægningen skal kunne repareres, såfremt den påføres skader, der indvirker på de funktionelle eller strukturelle egenskaber

Også her gælder det, at egenskaber kan være vitale og at mangler ubetinget bør afhjælpes. Det gælder fx hvor deformationer resulterer i sporkøring, således at vand ikke render af vejoverfladen, og der opstår risiko for akvaplaning.

De overordnede krav medfører i øvrigt nogle afledede krav til blandt andet vejens afvanding og dræning, som har en væsentlig indflydelse på vejanlæggets udformning og drift.

Figur 10. Slaghuller kendetegnes ved, at asfaltmaterialet lokalt er beskadiget og revet væk af trafikken, hvorved det ubundne bærelag er blotlagt.

Slaghuller kan skyldes frost/tø-påvirkning, bløde punkter i bærelag og underfund, eventuelt på grund af vandstrømning, oliestpild eller svage punkter i slidlaget.

Er det »kun« større eller mindre flager af slidlaget, der er løsnet og fjernet fra det underliggende asfaltbærelag, tales om afskalninger. Årsagen hertil kan være frost/tø-påvirkninger, klæbesvigt, buler som følge af indesluttet fugt mellem belægningslag, mangelfuld komprimering/vandindsamling i samlinger, forstort hulrumsindhold i slidlag eller for tyndt slidlag. Foto fra (5).



Hjultryk og kontakttryk

Vejbelægningens bæreevne

Det overordnede krav til vejens belægning er, at den skal være i stand til at overføre trafikbelastningen til vejens underbund, uden at der opstår skadelige deformationer og sætninger i den samlede vejbefæstelse og underbund.

Vejbefæstelsen kan i lighed med andre anlæg betragtes som en bærende konstruktion, der skal overføre nogle ydre påvirkninger til underbunden, se Figur 11.

Såfremt valg af materialetyper og befæstelsens principielle opbygning er fastlagt, vil belægnings-tykkelsen hovedsageligt afhænge af følgende forhold:

- Trafikbelastningen – jo større trafikbelastning, des tykkere skal belægningen være
- Underbundens bæreevne – jo svagere underbund, des tykkere skal belægningen være

Hensynet til frostsikkerheden er et supplerende krav, der kan få indflydelse på belægningens udformning. Er underbunden ikke frostsikker, kan det begrunde en forøgelse af den samlede befæstelses tykkelse, således at den opnår en vis størrelse. Forøgelsen kan fx ved hjælp af et bundsikringslag af sand.

Påvirkningerne fra trafikbelastningen kan beskrives ved:

- Det dimensionsgivende hjultryk, dvs. det maksimale hjultryk, der normalt tillades at forekomme på vejen
- Det akkumulerede antal tunge akselpassager, dvs. det samlede (akkumulerede) antal tunge aksler, der forventes at passere hen over vejen i løbet af belægningens funktionsperiode («levetid»)

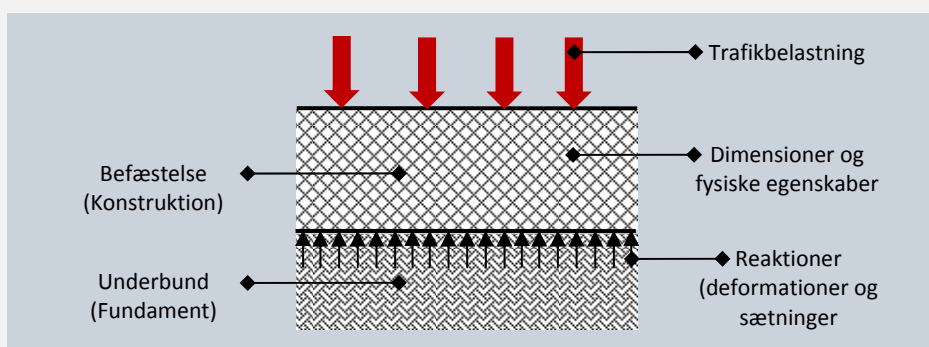
Det dimensionsgivende hjultryk

De maksimalt forekommende **hjultryk** og **kontakttryk** fra et bildæk er bestemmende for belægningens minimumsdimensioner. Disse påvirkninger kan bestemmes på grundlag af akseltrykket.

Akseltrykket er den samlede belastning fra køretøjet på en aksel, altså den samlede lodrette kraft, der overføres til vejen fra hjulene på en aksel.

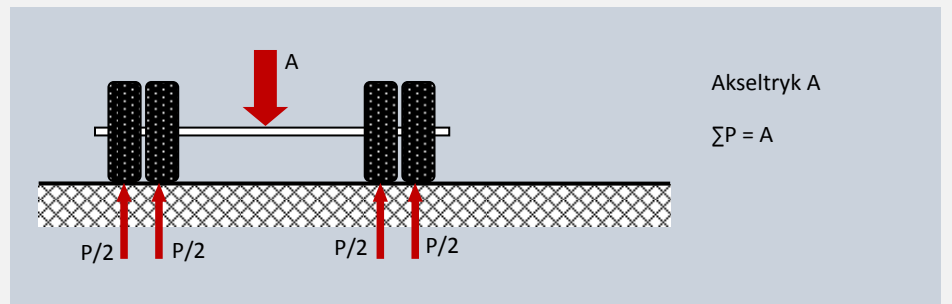
Fordeles dette akseltryk A ligeligt på hjulene, vil en tohjul aksel få hjultrykket $P = \frac{1}{2} \cdot A$. Hvis akslen er forsynet med tvillingehjul, vil det enkelte hjultryk blive lig $\frac{1}{2} \cdot P = \frac{1}{4} \cdot A$, jævnfør Figur 12.

Det maksimalt tilladte akseltryk i Danmark er 10.000 kg, jævnfør dimensionsbekendtgørelsen (6). Udtrykket dækker over den masse, en aksel maksimalt må bære. Akseltrykket svarer derfor til den tyngdekraftpåvirkning, denne masse foranlediger, , altså $9,818 \cdot 10.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \approx 100 \text{ kN}$.



Figur 11. Vejen som en bærende konstruktion.

Figur 12. Akseltryk og hjultryk.



Ifølge EU-bestemmelser tillades dog et maksimalt akseltryk på 11.500 kg (≈ 115 kN) for eksportlastbiler. Dette forventes at blive den fremtidige standard også for andre typer lastbiler.

Det **dimensionsgivende hjultryk** P regnes normalt at have en størrelse svarende til halvdelen af akseltrykket plus et stødtillæg på 20 % stødtillæg. Tillægget dækker dynamiske stødpåvirkninger og skæv fordeling af akseltrykket på hjulene. Når tyngdeaccelerationen betegnes g , fås:

$$[1] \quad P = \frac{1}{2} \cdot 10000 \cdot (1 + 0,20) \cdot g = 6000 \cdot 9,818 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \approx 60 \text{ kN}$$

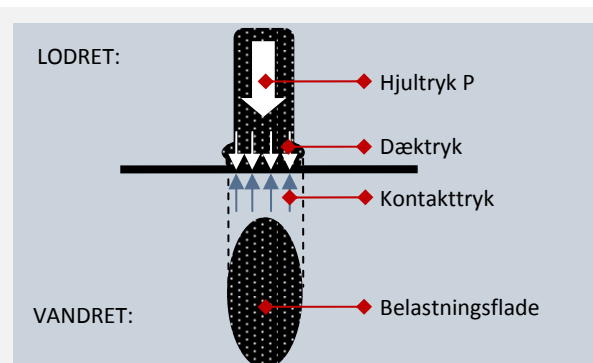
Ved tunge lastbiler overføres hjultrykket almindeligvis til vejoverfladen gennem **tvillingemonterede dæk** eller **supersingledæk**. For tvillingemonterede dæk kan belastningen til en vis dybde under vejoverfladen regnes at virke som tryk fra to enkelthjul, hvert af størrelsen $P/2$. Dybere nede i belægningen virker belastningen som ét hjultryk med den fulde størrelse P .

Det dimensionsgivende kontaktryk

De efterfølgende betragtninger tager sigte på hjultryk, der overføres til vejoverfladen gennem enkelthjul. Hjultrykket overføres gennem bilens dæk til vejen over en belastningsflade (et kontaktareal). Trykket per arealenhed på denne flade kaldes **kontaktrykket**. Det kan med god tilnærmelse regnes ensartet fordelt over belastningsfladen, se Figur 13. For ét dæk er belastningsfladens form erfaringsmæssigt ret nær en ellipse, hvis største akse er ca. dobbelt så stor som den lille akse.

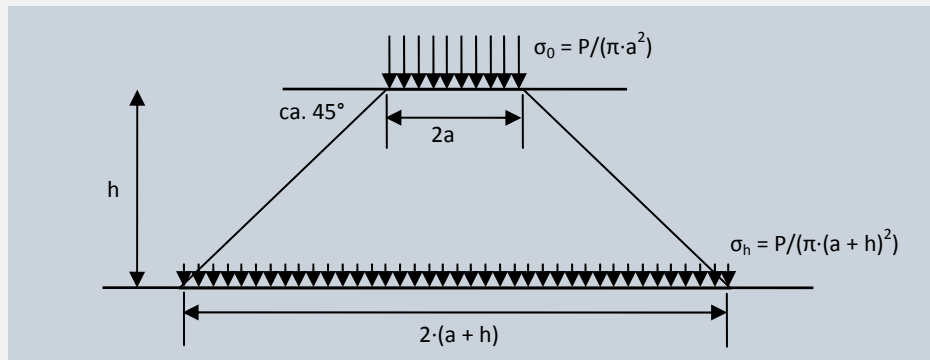
Kontaktrykket er i første række bestemt af det lufttryk, hvortil dækket er pumpet op, dvs. dæktrykket. Kontaktrykket vil kunne blive noget større end dæktrykket, formentlig af størrelsesordenen 5-10 %. Dette skyldes dels dækkets stivhed, dels at varmeudviklingen i dækket under kørslen forøger det øjeblikkelige lufttryk i dækket.

De teoretiske beregninger vedrørende vejes bæreevne forenkler man i reglen ved at forudsætte en cirkulær belastningsflade med samme areal som den egentlige elliptiske flade. Imellem **radius** a [m] i denne cirkulære flade, **hjultrykket** P [N] og **kontaktrykket** σ_0 [N/m²] består følgende relationer:



Figur 13. Kontaktryk og belastningsflade.

Figur 14. Kegleformet trykspredning.



$$[2] \quad P = \sigma_0 \cdot \pi \cdot a^2$$

$$[3] \quad \sigma_0 = \frac{P}{\pi \cdot a^2}$$

$$[4] \quad a = \sqrt{\frac{P}{\sigma_0 \cdot \pi}}$$

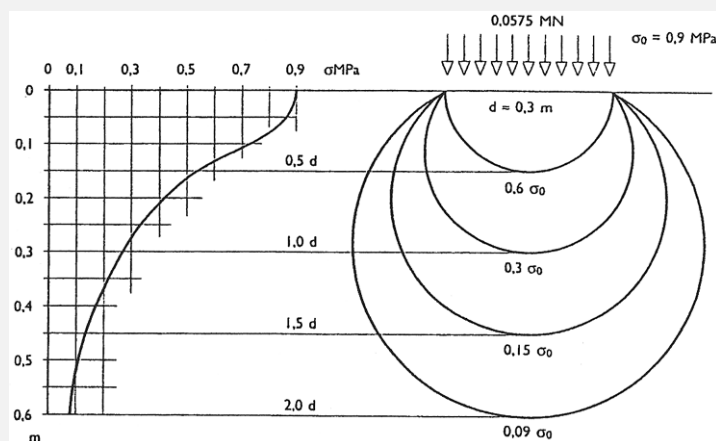
Kontakttrykket vil især være bestemmende for spændinger og tøjninger i den øverste del af vejbefæstelsen. Størrelsen af hjultrykket P vil være afgørende for påvirkningen af de nedre lag af befæstelsen og af underbunden.

Under hensyntagen til det tilladelige akseltryk på 11,5 tons, et stødtillæg på 20 % og øget anvendelse af supersingledæk med relativt høje dæktryk, kunne man overveje, at sætte det **dimensionsgivende kontaktryk** til 0,90 MPa (N/mm²). De danske vejreglers dimensionsgivende belastning tager afsæt i en 10 tons aksel med to tvillingehjul med indbyrdes C-C-afstand mellem dækkene på 350 mm. (3)

Trykkets fordeling gennem befæstelsen

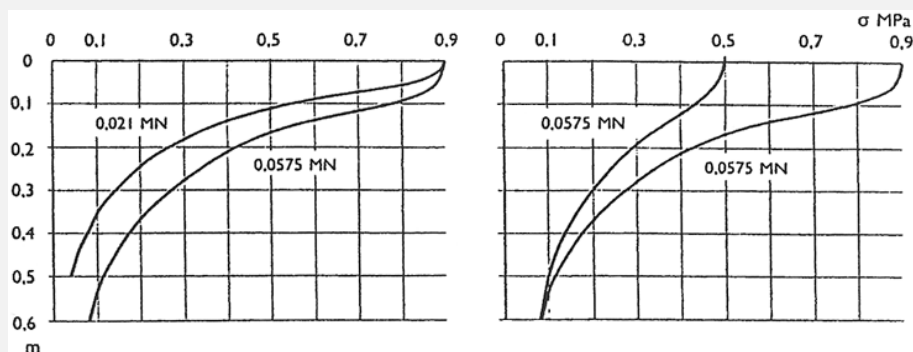
Fra overfladen fordeler belastningen sig ned gennem belægningen til underbunden. Belastningsfordelingen ned gennem belægningen og på underbunden er afhængig af den valgte belægningsopbygning, samt af bærelagenes og bundsikringslagets tykkelse og materialeegenskaber.

For en **makadambelægning** (grus og skærver) kan den gennemsnitlige belastning uden større fejl baseres på en belastningsfordeling under 45°, altså fordelt efter en keglestub ned gennem belægningen, jævnfør Figur 14.



Figur 15. Trykspredning efter »kugleteorien«. Kurverne er tegnet gennem punkter med samme vertikaltryk (»isobarer«), og de danner kuglelignende figurer. Fra (7).

Figur 16. Hjultrykkets og kontaktrykkets indflydelse på trykspændingens variation. Fra (7).



Fordelingen af trykket ned gennem en **asfaltbelægning** sker nærmere svarende til kurverne på Figur 15. Den lodrette trykspænding under belastningsfladens midte er betegnet som σ . Kurverne/fladerne på figurener tegnet gennem punkter med samme vertikaltryk og afviger lidt fra den rene kugleform. Kurverne gælder ikke for en vejbefæstelse, som er sammensat af forskellige, relativt tynde lag, men trykfordelingen sker også i det tilfælde nogenlunde som figuren viser.

De to kurver til venstre i Figur 16 viser trykspændingens variation ned gennem et tykt gruslag for et hjultryk på 21 kN (0,021 MN) henholdsvis et hjultryk på 57,5 kN (0,0575 MN). Dæktrykket er i begge tilfælde 0,90 MPa. Kontaktrykket er her tilnærmelsesvis sat lig med dæktrykket.

For det samme hjultryk på 57,5 kN (0,0575 MN), men et dæktryk på 0,50 MPa henholdsvis 0,90 MPa, ville trykspændingen variere efter de to kurver til højre på Figur 16.

Af de to grafer kan man udlede følgende. Allerøverst i asfaltbelægningen er trykspændingen kun afhængig af kontaktrykkets størrelse, mens hjultrykket ingen betydning har. Ned gennem bærelagene afhænger spændingerne, og dermed deformationerne, både af kontaktryk og hjultryk. Først i 0,4-0,5 m's dybde er det alene hjultrykkets størrelse, der har betydning.

Da de fleste skader på vejbelægninger erfaringsmæssigt har vist sig at skyldes manglende bæreevne i de underliggende lag, kunne man på grund af Figur 16 måske drage den slutning, at hjultrykket alene og ikke kontaktrykket er afgørende for befæstelsens holdbarhed. Dette er imidlertid ikke tilfældet. De koncentrerede vertikaltryk i de øverste lag fremkalder bøjningstrækspændinger og store trykspændinger i disse. Ved dimensioneringen må der tages hensyn hertil for at undgå skader i de øverste lag af befæstelsen og dermed reduktion af den samlede bæreevne.

Trafikklasse og dimensioneringstrafik

Trafikklasse

Ved de danske vejreglers simpleste dimensioneringsmetode, *katalogmetoden*, henføres vejstrækningen til én ud af 8 trafikklasser: T0-T7.

Opdelingen er baseret på antallet af lastbiler eller på antallet af $\text{Æ}10$ aksler pr. dag, $N_{\text{Æ}10}/\text{døgn}$.

Trafikklasserne fremgår af Tabel 1.

I trafikklasse T0 skal det tages bogstaveligt, at der kun færdes lette køretøjer på vejarealet; der bør således træffes aktive foranstaltninger mod at tunge køretøjer – herunder snedrydningsmateriel – kører på vejen/stien.

Dimensioneringstrafikkens belastning

Ved den analytisk-empiriske dimensioneringsmetode skal belastningen fra dimensioneringstrafikken bestemmes.

Køretøjsakslens bidrag til $\text{Æ}10$ -lasten

Størrelsen af det dimensionsgivende trafikbelastning fastlægger, hvor stor en minimumsbæreevne belægningen skal kunne yde i hele dens funktionsperiode eller »levetid«, også kaldet **dimensioneringsperioden**. Imidlertid forårsager de tunge akselpassager nogle langtidsdeformationer i befæstelse og underbund, således at belægningens bæreevne aftager med tiden, jævnfør Figur 17.

Der sker en løbende nedbrydning af vejmaterialernes indre sammenhæng og styrke i takt med, at de tunge akseltryk passerer hen over og påvirker belægningen. Dette resulterer på et tidspunkt i træthedbrud eller udmattelsesbrud indenfor funktionsperioden, såfremt belægningens dimensioner og styrke ikke er tilstrækkelig fra starten.

For et givet dimensionsgivende hjultryk og givne underbundsegenskaber vil belægningens dimensioner derfor også afhænge af, hvor mange tunge aksler der passerer hen over vejbelægningen i løbet af dens dimensioneringsperiode. Dette samlede og over tiden voksende mål for trafikbelastningen kaldes det **akkumulerede antal tunge akselpassager**.

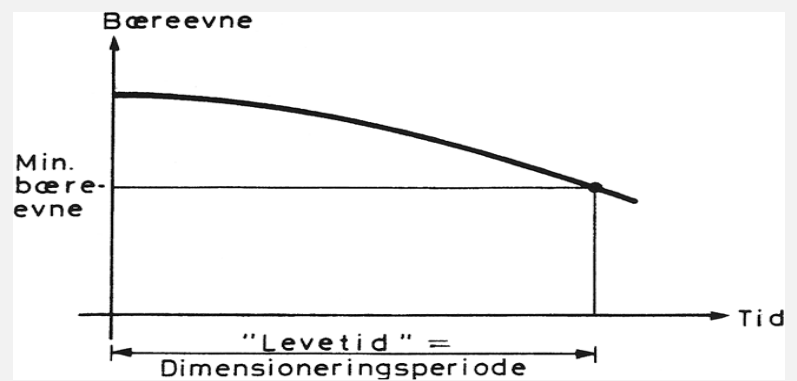
Det akkumulerede antal tunge akselpassager angives som det ækvivalente antal 10-ton (≈ 100 kN) akseltryk. Størrelsen benævnes den **akkumulerede $\text{Æ}10$ -last** og betegnes ved $N_{\text{Æ}10}$; enheden er »ækvivalente 10-ton akseltryk«, forkortet som » $\text{Æ}10$ « eller » $\text{Æ}10$ -aksler«.

Bidraget til $\text{Æ}10$ -lasten fra en enkelt akselpassage med akseltrykket A beregnes efter den empiriske potensformel:

| Trafik-klasse | Lastbiler pr. døgn Begge retninger i alt | $N_{\text{Æ}10}/\text{døgn}$ pr. spor (øvre grænse) | $N_{\text{Æ}10}/\text{år}$ (dimensioneringstrafik) |
|---------------|---|--|---|
| T0 | Kun lette køretøjer | - | - |
| T1 | Mindre end 1 | 0,5 | 75 |
| T2 | Op til 75 | 20 | 7.300 |
| T3 | 75 – 150 | 50 | 18.300 |
| T4 | 150 – 600 | 200 | 73.000 |
| T5 | 600 – 1.400 | 500 | 180.000 |
| T6 | 1.400 – 2.000 | 800 | 300.000 |
| T7 | Flere end 2.000 | 1.500 | 500.000 |

Tabel 1. Trafikklasser. Der er forudsat en tosporet vej med normal køresporsbredde. I klasse T7 er $N_{\text{Æ}10}$ -værdierne principielt ubegrænsede, de anførte værdier kan bruges som standardværdier i dimensioneringsprogram.
Fra (3).

Figur 17. Belægningens bæreevne aftager med tiden.



$$[5] \quad \Delta N = \left(\frac{A}{10} \right)^\alpha$$

hvor: A indsættes i tons.

Udtrykket blev udledt som et af resultaterne af en række fuldskalaforsøg, der i slutningen af 1950'erne blev udført i USA af »American Association of State Highway Officials« (AASHO). Udtrykket kaldes i reglen »4. potens formlen«, idet eksponenten α ofte sættes lig 4.

Nyere erfaringer tyder på, at der for særligt store akseltryk bør anvendes en endnu større værdi af eksponenten α . Det ses af formlen, at kun de tunge køretøjer giver et mærkbart bidrag til langtidslasten. Det forudsættes i øvrigt, at den tidsmæssige fordeling af akselpassagerne ikke har nogen mærkbar indflydelse på nedbrydningen og dimensioneringen.

Eksempel A

Personbil med maksimalt tryk på bagakslen: 0,7 tons.

Lastbil eller bus med maksimalt tryk på bagakslen: 11,5 tons.

Bidraget til $\text{Æ}10$ -lasten fra bagakslerne bliver herefter:

$$\Delta N_{\text{personbil}} = \left(\frac{0,7}{10} \right)^4 = 0,24 \cdot 10^{-4} \text{ Æ}10$$

$$\Delta N_{\text{lastbil}} = \left(\frac{11,5}{10} \right)^4 = 1,75 \text{ Æ}10$$

Én lastbil med 11,5 tons tryk på bagakslen har således tilnærmelsesvis en lige så stor nedbrydende virkning på en vejbelægning som ca. 70.000 personbiler med et akseltryk på 0,7 tons, forudsat der regnes med samme forhold mellem forakslene.

Dimensioneringstrafikbelastningen

I praksis fastlægges den dimensionerende belastning fra trafikken ikke ved at summere bidragene fra de enkelte akseltryk. I stedet er der for opstillet gennemsnitlige $\text{Æ}10$ -tal, standard- $\text{Æ}10$ -faktorer, for typiske grupper af køretøjer. Grupperne bygger på, at de tunge køretøjer er opdelt enten efter køretøjsart eller efter køretøjslængde.

Standard- $\text{Æ}10$ -faktorerne er generaliserede resultater fra 8 målesteder, hvor der foretages systematiske akseltrykregistreringer.¹ De gør det muligt at beregne den totale $\text{Æ}10$ -belastning på en vej ved blot at registrere trafikken opdelt i efter en af grupperingerne og derefter gange trafiktallene med faktorerne.

¹ De permanente akseltrykmålinger finder sted 4 steder på motorvejene (mellem Ringsted og Sorø, mellem Køge og Rønnede, mellem Kolding og Esbjerg samt mellem Hobro og Aalborg), 2 steder på almindelige 2-sporede veje (mellem Køge og Roskilde henholdsvis mellem Århus og Viborg) og 2 steder på bygader i i byer uden egentlig gennemkørende trafik (Odense og Aabenraa).

Standard-Æ10-faktorerne er imidlertid ikke helt tilstrækkelige. Dels er det nødvendigt at korrigere på visse færdselsarealer, hvor trafikbelastningen koncentrerer sig i større eller mindre grad. Dels anvender mange af de store vogntog anvender en dæktype, hvor de traditionelle tvillingmonterede dæk, der anvendes som reference, er erstattet af bredere supersingledæk, som har en betydelig større skadevirkning på belægningerne.

I dette øjemed betjener de danske vejregler (3) sig af et sæt korrektionsfaktorer ved bestemmelsen af Æ10-lasten. Størrelsen af $N_{\text{Æ10}}$ pr. kørespor i dimensioneringsperioden beregnes ud fra vejens trafikmængde efter følgende formel:

$$[6] \quad N_{\text{Æ10}} = P \cdot K_F \cdot K_K \cdot K_R \cdot F_{SS} \cdot \sum_i (F_{\text{Æ10},i} \cdot p_i \cdot P_L \cdot N_{\text{ADT}} \cdot 365 \cdot 0,86)$$

hvor: P er en vækstfaktor, jævnfør nedenfor

K_F , K_K , K_R og F_{SS} er korrektionsfaktorer, jævnfør nedenfor

indeks i angiver gruppering efter køretøjsart eller køretøjslængde, jævnfør nedenfor

$F_{\text{Æ10},i}$ er standard-Æ10-faktoren, jævnfør nedenfor

p_i er andelen, som pågældende køretøjsart eller køretøjslængde udgør af den tunge trafik

P_L er lastbilprocenten på strækningen

N_{ADT} er årsdøgntrafikken

Vækstfaktoren P

Vækstfaktoren P tager højde for trafikstigningen gennem dimensioneringsperioden på n år. Faktoren beregnes ud fra Æ10-lastens årlige stigning, α :

$$[7] \quad P = \frac{(1 + \alpha)^n - 1}{\alpha}$$

Hvis tilvæksten ikke er stigende, men konstant, anvendes i stedet formlen:

$$[8] \quad P = n \cdot \left(1 + (n-1) \cdot \frac{\alpha}{2} \right)$$

Dimensioneringsperioden, n , vælges normalt til 10, 15 eller 20 år. Ved beregning af trafikbelastningen skal man imidlertid ikke blot tænke på den løbende fremskrivning af trafikken, men bør også vurdere, om vejstrækningen må forventes at blive belastet af tunge transportere fra nye aktiviteter, fx fra nye industriområder.

Korrektionsfaktoren K_F

Korrektionsfaktoren K_F tager højde for lastbilernes fordeling over vejens tværsnit. Faktoren fastsættes i de danske vejregler (3) således:

- På smalle veje, hvor trafikken forventes at køre i et spor: $K_F = 1,00$
- På 2-sporede veje: $K_F = 0,50$
- På 4-sporede veje: $K_F = 0,45$

Korrektionsfaktoren K_K

Korrektionsfaktoren K_K tager højde for eventuel kanalisering af trafikken, fx i forbindelse med miljøprioriterede gennemfarter. Faktoren fastsættes i de danske vejregler (3) således:

- I opmarchfelter og i kanaliserede kryds med kantsten: $K_K = 2,0$
- I miljøprioriterede gennemfarter og lignende: $K_K = 1,5$
- Ved normal køresporbredde (3,75 m): $K_K = 1,0$

Korrektionsfaktoren K_R

Korrektionsfaktoren K_R tager højde for særlige forhold, som fx vridning, der gør sig gældende i rundkørsler. Faktoren fastsættes i de danske vejregler (3) således:

Tabel 2. Standard-Æ10-faktor, $F_{Æ10}$, opdelt på køretøjsart. Fra (3).

| Køretøjsart | Andre veje | Bygader |
|-----------------|------------|---------|
| Sololastbiler | 0,4 | 0,3 |
| Påhængsvognstog | 1,5 | 0,9 |
| Sættevognstog | 1,2 | 0,5 |
| Busser | 0,6 | 0,6 |

- På lige vej: $K_R = 1,0$
- I rundkørsel med enkelt kørespor: $K_K = 2,0$
- I rundkørsel med to eller flere kørespor: $K_K = 1,0$

Korrektionsfaktoren F_{SS}

Korrektionsfaktoren F_{SS} tager højde for i hvilket omfang supersingledæk må påregnes at indgå i de tunge køretøjers dækmontering på vejstrækningen. Faktoren fastsættes i de danske vejregler (3) således:

- På motorveje: $F_{SS} = 1,3$
- På øvrige hovedlandeveje og landeveje:¹ $F_{SS} = 1,3$
- På kommuneveje: $F_{SS} = 1,0 - 1,2$

Vejreglerne anfører, at den høje værdi for kommuneveje bør anvendes på trafikveje og den lave på andre kommunale veje.

Standard-Æ10-faktorerne $F_{Æ10}$

Standard-Æ10-faktorerne, $F_{Æ10}$, angiver, hvor stor et belastningsbidrag, det enkelte tunge køretøj i en gruppe i gennemsnit bidrager med, jævnfør udtryk [5]. Faktorerne indregner således, hvor store akseltryk, der faktisk optræder; størrelsen afhænger altså ikke alene af de maksimalt tilladte akseltryk, men også af, hvor tungt køretøjerne faktisk er læsset i gennemsnit. Trafikbelastningen fra biler, som kører med akseltryk, der er større end det tilladte, indgår som alle andre akseltryk i faktorerne.

Standard-Æ10-faktorerne er fastlagt for to forskellige gruppeinddelinger af trafikens tunge køretøjer. I begge tilfælde er fastlagt et sæt faktorer for bygader og et andet sæt for alle andre veje.

Den traditionelle inddeling, der anvendes ved manuelle trafiktællinger, inddeler de tunge køretøjer i lastbiler, påhængstog, sættevognstog og busser. De tilhørende standard-Æ10-faktorer fremgår af Tabel 2.

Den anden inddeling tager afsæt i køretøjslængden, idet man herved kan udnytte resultater fra maskinelle længdeklassifikationer af trafikken. Resultaterne er behæftet ved den usikkerhed, der ligger i at personbiler med påhæng bliver registreret sammen med busser og lastbiler. De standard-Æ10-faktorer, der knyttes til denne inddeling fremgår af Tabel 3.

Årsdøgntrafikken og lastbilprocenten

Årsdøgntrafikken, N_{ADT} , og lastbilprocenten, P_L , der indgår i udtrykket [6], beskriver den talte eller beregnede trafik i begge retninger. Et tungt køretøj er i denne sammenhæng ethvert køretøj på over 3,5 tons tilladt totalvægt.

Tabel 3. Standard-Æ10-faktor, $F_{Æ10}$, opdelt efter køretøjslængde. Fra (3).

| Længdegruppe | Andre veje | Bygader |
|--|---|--------------|
| Ved opdeling af lastbiler i to længdegrupper | 5,8 – 12,5 m: 0,35 Over 12,5 m: 1,35 | 0,25 0,65 |
| Uden opdeling af lastbiler i længdegrupper | Over 5,8 m: 0,75 | 0,30 |

¹ Hovedlandeveje er de veje, som staten (Vejdirektoratet) er vejbestyrelse for. Landeveje var, indtil kommunalreformen i 2007, de veje, som amtskommunerne bestyrede.

Konstanterne i udtryk [6] opregner antallet af lastbiler til et år (365 dage), idet **faktoren 0,86** tager højde for, at der er mindre lastbiltrafik på hverdage i tidsrummet kl. 18 – 06 og i weekender.

Eksempel B

En hovedlandevej skal forlænges som 4-sporet omfartsvej. Befæstelsen skal dimensioneres for 20 år. Resultatet af trafikberegninger er, at der ved ibrugstagningstidspunktet kan forventes 1.200 lastbiler over 5,8 m's længde dagligt i begge retninger tilsammen. Der forventes en jævn trafikstigning på 50 lastbiler pr. døgn over hele perioden.

Trafikstigningen i det 1. år er $50/1200 = 0,0417$, og vækstfaktoren P findes derfor af udtryk [8] til:

$$P = 20 \cdot \left(1 + 19 \cdot \frac{0,0417}{2} \right) = 27,9$$

Da der er tale om en 4-sporet vej, er $K_F = 0,45$. Korrektionsfaktorerne K_K og K_R er begge 1.

Da vejen er klassificeret som hovedlandevej, er $F_{SS} = 1,3$, og der kan regnes med en standard-Æ10-faktor på $F_{Æ10} = 0,75$, jævnfør Tabel 3.

Dimensioneringstrafikken i et kørespør over hele dimensioneringsperioden bliver derfor:

$$N_{Æ10} = 27,9 \cdot 0,45 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 0,75 \cdot 1200 \cdot 365 \cdot 0,86 = 4600000 \text{ Æ10-aksler}$$

Ønskes dimensioneringen foretaget med MMOPP, skal man være opmærksom på, at programmet ikke kan regne med konstant vækst. I stedet kan man fordele trafikken jævnt ud over de 20 år med en vækst på 0 % pr. år, altså:

$$N_{Æ10} \text{ pr. år} = 230000 \text{ Æ10-aksler}$$

Lastbilmængden ved periodens begyndelser placerer vejen i trafikklasse T5, jævnfør Tabel 1. Den gennemsnitlige Æ10-belastning svarer imidlertid til trafikklasse T6. Da lastbilmængden ligger relativt højt i T5, vil det være fornuftigt at dimensionere vejbefæstelsen ud fra T6.

Underbund og frostfølsomhed

Underbundens beskaffenhed er i sidste ende afgørende for, hvor tyk en vejbefæstelse, der er nødvendig for at bære dimensioneringstrafikken. De to afgørende forhold er underbundens bæreevne, oftest udtrykt ved dens E -værdi, E_m [MPa] og den frostfølsomhed.

Underbundens bæreevne

Elasticitetsmodul

Underbundens E -værdi, E_m , kan bestemmes i marken ved pladebelastningsforsøg, i dag oftest med et faldlodsapparat. Værdien angives i MPa ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MN/m}^2$).

Det har vist sig, at måling af E_m -værdier ved pladebelastningsforsøg direkte på råjordens overflade (planum) giver upålidelige resultater. Dette kan skyldes, at måleresultatet er følsomt overfor andre forhold end råjordens bæreevneegenskaber. Det kan fx være en følge af, at råjordens øverste lag udsættes for kortvarige klimapåvirkninger som regnskyl og soludtøring. Derfor bestemmes E_m -værdien bedst indirekte, ved pladebelastningsmålinger på ovenliggende bærelag. Dette forhold lægger begrænsninger på dimensioneringsmetoden til brug ved større vejanlæg.

I almindelighed vil underbundens E_m -værdi kunne variere mellem meget vide grænser, selv indenfor samme jordart.

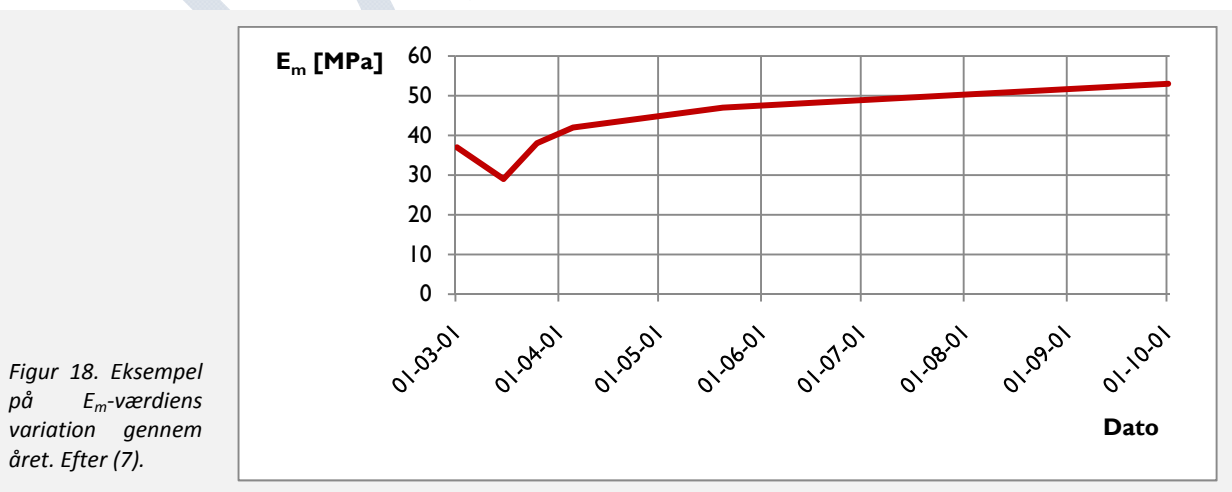
Afvandings- og dræningsforhold samt placering i afgravning eller påfyldning vil have indflydelse på disse variationer. En sikker vurdering vil ofte kræve særlige undersøgelser.

Det er vigtigt at bemærke, at E_m -værdien ikke blot afhænger af jordbundens art og vandindhold, men reelt også er afhængig af den effektive spænding i jorden, dvs. afhængig af både belastning og evt. porevandstryk.

Især tørtbrudsperioden er kritisk for underbundens bæreevne. I denne periode kan der ske en kraftig opblødning af jordlagene, hvilket medfører en betydelig reduktion af E_m -værdien, jævnfør Figur 18.

CBR-værdi

Et alternativt udtryk for underbundens bæreevne er CBR -værdien. CBR er en forkortelse af »California Bearing Ratio«.



Figur 18. Eksempel på E_m -værdiens variation gennem året. Efter (7).

*Tabel 4. E_m -værdier for underbund. Fra (3).
Note: *) Afhængigt af in situ vandindhold.
Består underbunden af andre materialer, fastlægges E_m -værdien ud fra felt- eller laboratiormålinger*

| Jordarter | E_m -værdi [MPa] |
|---------------------------------------|--------------------|
| Moræneler, kalkfrit*) | 10 – 20 |
| Moræneler, kalkholdigt*) | 20 – 50 |
| Moræneler, fedt, kalkholdigt*) | 10 – 30 |
| Senglaciale ler- og siltaflejringer*) | 5 – 15 |
| Sand, fint (frostfarligt) | 40 – 70 |
| Sand | 70 – 150 |
| Grus | 100 – 300 |

Et materiales bæreevne udtrykt ved *CBR*-værdien er størrelsen af den kraft, der under nogle standardiserede forsøgsbetingelser er nødvendig for at presse et stempel ned i materialet. Nedpresningen af stemplet sker i en cylindrisk metalform med konstant hastighed og til en bestemt dybde. *CBR*-værdien angives da som den målte kraft i procenttal af den kraft, som er fundet ved en tilsvarende måling på et standardmateriale.

CBR-forsøg kan udføres såvel i marken som i laboratorium. *CBR*-værdier lægges i dag i svindende omfang til grund for egentlig belægningsdimensionering, men de kan anvendes til supplerende undersøgelser af generelle materialeegenskaber, fx den relative bæreevnes afhængighed af vandindholdet.

Er *CBR*-værdien kendt, kan den for kohæsionsjord skønsmæssigt omregnes til E_m -værdien (i MPa) ved hjælp af den følgende empiriske formel:

$$[9] \quad E_m \approx 17,6 \cdot CPR^{0,64}$$

De fleste kilder, blandt andet (8) og (7), foreslår følgende omregningsformel:

$$[10] \quad E_m \approx 10 \cdot CPR$$

Danske jordarters E_m -værdier

Til grovere skøn kan, alt efter omstændighederne, anvendes de vejledende værdier for E_m , som vejreglerne (3) angiver, jævnfør Tabel 4.

Som standardværdier for de tre underbundsbetegnelser »Frostsikker«, »Frosttvivlsom« og »Frostfarlig«, jævnfør Tabel 5 nedenfor, anvender vejreglernes katalogbefæstelser og dimensioneringsprogrammet MMOPP værdierne 100 MPa, 40 MPa henholdsvis 20 MPa. (3)

Sikring mod frostfølsomhed

Hvis strækningens jordarter ikke kan fastlægges ud fra tidligere erfaringer, der giver et velunderbygget kendskab til jordbundsforholdene, bør der udføres undersøgelse i marken.

Hvis de aktuelle jordarters frostrisiko ikke på anden måde er bestemt, foreslår de danske vejregler, at den samlede tykkelse af befæstelsens som minimum bliver, som angivet i nedenstående Tabel 5. Ved fastlæggelse af værdierne i Tabel 5 er det forudsat, at der etableres et velfungerende afløbssystem for såvel overfladevand som for grundvand. Hvor der anvendes kantsten eller rørlagt afløb fra kørebanen og befæstet fortov eller rabat, kan tabellens tykkelser for frostsikring reduceres med 100 mm. (3).

Tabel 5. Mindste totale belægningstykkelser under hensyn til frost-hævningsrisiko. Fra (3).

| Risikogruppe Materialetyper: Trafikklasse: | Frostsikker | Frosttvivlsom | Frostfarlig |
|--|--|------------------|--|
| | Sand og grus uden betydende partier af silt og siltholdigt ler | Moræneler og ler | Silt og meget siltholdige jordarter med mulighed for vandtilførsel |
| T0 | Som bestemt ud fra analytisk-empirisk dimensionering | 400 mm | 500 mm |
| T1 | | 500 mm | 600 mm |
| T2 | | 600 mm | 700 mm |
| T3, T4, T5, T6 | | 700 mm | 900 mm |

I forbindelse med vejanlæggets udførelse bør jordarter og andre forhold i råjorden, der faktisk kan konstateres under planum, sammenholdes med de for dimensioneringen forudsatte jordarter og forhold. Hvis der optræder afvigelser mellem faktiske og forudsatte forhold, må de endelige overbygningstykkelser korrigeres.

UDKAST

Materialeegenskaber og katalogbefæstelser

Materialeegenskaber

Egenskaberne ved et befæstelsesmateriale kan bestemmes på grundlag af målinger i marken eller i laboratoriet. Ved dimensionering, hvor de materialer, der aktuelt skal anvendes, endnu ikke er fremstillet, går man den anden vej. På grundlag af erfaringer om egenskaberne ved forskellige materialetyper, gør man sig forudsætninger om de egenskaber, som materialet skal have. Når dimensioneringen er færdig, og vejen skal anlægges, bestiller man materialer med de ønskede egenskaber.

At materialerne i befæstelsen vitterlig får disse egenskaber sikres ved at stille krav i udbudsmaterialet. Kravene gælder råvarer og produktion af befæstelsesmaterialerne, herunder den kvalitetskontrol, som fabrikanten skal føre og dokumentere. Kravene gælder endvidere udlægningen af befæstelsesmaterialerne og efterbehandlingen af belægningslagene.

Der er en nøje sammenhæng mellem de materialeegenskaber, man kan tillade sig at forudsætte i dimensioneringen, og de krav og processer, der anvendes ved produktion og udlægning af materialerne. De egenskaber, der efterfølgende angives, og som anvendes i de danske dimensioneringsvejregler (3), kan man derfor kun forvente at opnå, hvis materialerne opfylder de krav, der er anført i de gældende udbuds- og anlægsskrifter for pågældende materiale, og hvis materialerne bliver behandlet i overensstemmelse med god praksis inden for vejbygningsfaget.

Bitumenbundne materialer

Elasticitetsegenskaber

For de bitumenbundne materialer gælder, at Poissons forhold, ν , normalt sættes til 0,35.

De mest almindeligt forekommende bitumenbundne materialers E -værdi fremgår af Tabel 6. Materialerne er betegnet ved de forkortelser, der normalt anvendes. Tabellen angiver det aktuelle interval for bitumenpenetrationen¹ samt et lagtykkelsesinterval; dette interval udtrykker blandt andet den minimumstykkelse, som er nødvendig, for at udlægning og efterbehandling af belægningslaget kan udføres forskriftsmæssigt.

Temperaturkorrektion i de øverste 10 cm

Da materialeegenskaberne for asfalt er meget temperatur- og klima-afhængige, refererer E -værdien for asfalt til en såkaldt ækvivalent temperatur. Den **ækvivalente temperatur** defineres som den asfalttemperatur, ved hvilken 12 passager af én 10-ton standardaksel (10 tons \approx 100 kN) vil bevirke den samme nedbrydning som én akselpassage i hver af årets 12 måneder. (8)

Under danske forhold er den ækvivalente temperatur fastsat til 28 °C for de øverste 100 mm af asfaltlaget, og til 25 °C for den del af asfaltlaget, der ligger dybere. Dette er baggrunden for, at E -værdien for de øverste 100 mm sættes lavere end for resten af laget. I praksis krummer arbejdskurven for asfalt, og de aftagende spændinger ned gennem asfaltlaget medvirker derfor også – om end i mindre omfang – til, at E -værdien er større i de nederste lag af asfalten.

Den E -værdi (E_1), der indsættes for asfaltlaget i de elasticitetsteoretiske formler, kan beregnes som et vægtet gennemsnit af E -værdien for de øverste 100 mm og for resten af asfaltlaget.

¹ Penetrationen er et mål for en bitumens bearbejdelighed. Penetrationen er den dybde (i tiendedele millimeter), hvortil en standardnål synker ned i bitumen under nærmere fastlagte forsøgsbetingelser, herunder belastning af nålen og temperatur. Jo større penetration, des blødere er den pågældende bitumen.

Tabel 6. Materialeparametre for bitumenbundne materialer. Belægningstypernes forkortelser er: OB: Overfladebehandling¹; MOB: Modifieret overfladebehandling; TB-k: Tyndlagsbelægning²; PA: Pulverasfalt³; AB: Asfaltbeton⁴; SMA: Skærvematriks⁵; DA: Drænasfalt⁶; ABB: Asfaltbinderbeton⁷ samt GAB: Grusasfaltbeton⁸ (type 0, 1 henholdsvis 2). Efter (3).

| Dybde under vejoverflade [mm] | Materiale | Bitumenpenetration. | E-værdi [MPa] | Interval for lagtykkelse [mm] |
|-------------------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------------------------|
| Indtil 100 | OB og MOB | Alle typer | 500 | 10-15 |
| | TB-k | 330/430 | 500 | 10-15 |
| | TB-k | 250/330 | 500 | 10-15 |
| | TB-k | 160/220 | 1000 | 15-25 |
| | TB-k | 70/100 | 1000 | 15-25 |
| | PA | 330/430 | 500 | 15-45 |
| | PA | 250-330 | 500 | 15-45 |
| | AB | 160/250 | 1000 | 20-55 |
| | AB | 70-100 | 2000 | 20-55 |
| | AB | 40/60 | 3000 | 25-55 |
| | SMA | 40/60 | 3000 | 25-50 |
| | SMA | Modifieret | 3000 | 25-50 |
| | DA | Modifieret | 1500 | 40-45 |
| | ABB | 40/60 | 3000 | 40-90 |
| | ABB | Modifieret | 3000 | 40-90 |
| | GAB 0 | 70/100 | 2000 | 50/100 |
| | GAB 0 | 40/60 | 3000 | 40-75 |
| | GAB 1 | 70/100 | 2000 | 50-100 |
| | GAB 1 | 40/60 | 3000 | 60-110 |
| | GAB 2 | 40/60 | 3000 | 80-180 |
| Over 100 | Semifleksibel | 70/100 | 8000 | 40-80 |
| | AAB | 40/60 | 5000 | 40-90 |
| | ABB | Modifieret | 5000 | 40-90 |
| | GAB 0 | 70/100 | 3000 | 40-90 |
| | GAB 0 | 40-60 | 5000 | 40-75 |
| | GAB 1 | 70/100 | 3000 | 50-100 |
| | GAB 1 | 40/60 | 5000 | 60-110 |
| | GAB 2 | 40/60 | 5000 | 80-180 |

¹ OB – overfladebehandling er en slidlagstype. Den fremstilles ved at påføre vejoverfladen et flydende bindemiddel og efterfølgende afdække bindemidlet med stenmateriale. OB betegnes ved den anvendte stensortering: 2/5, 5/8 henholdsvis 8/11 [kornstørrelsen i mm]. Der skelnes mellem 1, 1½, 2 og 2½ OB. Bitumenhinden er relativt tyk, og giver en god beskyttelse mod nedtrængning overfladevand. Efter udlægning, inden materialet er afbundet, er der risiko for stenafspring; Derfor påbydes trafikken nedsat hastighed.

² TB – tyndlagsbelægning er en slidlagstype i form af asfaltmateriale med en halvåben gradering, udlagt på 1 – 1,5 kg/m² emulsion i én arbejdsgang i tynde lag.

³ PA – pulverasfalt er en slidlagstype, hvis stenmateriale i det væsentlige er kontinuert graderet, og hvori bitumen har en penetration på mindst 250. Materialet fremstilles i en tæt gradering (ABt) og i en åben gradering (ABå) og karakteriseres efter stenmaterialets art og kornkurve: PA 4t, 6t, 8t, 11t, 16t henholdsvis 6å, 8å, 11å, 16å [maksimal kornstørrelse i mm]. Bindemiddelindholdet afhænger af stenmaterialets gradering, trafikbelastningen og indbygningsmåden.

⁴ AB – asfaltbeton er en asfalttype, hvis stenmaterialet i det væsentlige er kontinuert graderet, så der dannes en sammenknyttet struktur, og hvori bitumen højst har penetration 220. Materialet fremstilles i en tæt gradering (ABt) og i en åben gradering (ABå). Materialet karakteriseres efter stenmaterialets art og kornkurve: AB 6t, 8t, 11t, 16t henholdsvis 6å, 8å, 11å, 16å [maksimal kornstørrelse i mm]. Materialet skal komprimeres straks efter udlægning.

⁵ SMA – skærvemastiks en en åbengraderet type af asfaltbeton (AB) tilsat special filler med meget stor overflade i forhold til vægten, således at stenskelletet kan binde en stor bitumenmængde og alligevel opnå en lav hulrumsprocent. Materialet karakteriseres efter kornkurve: SMA 8, 11, 16 {maksimal kornstørrelse i mm}. SMA anvendes som slidlag, navnlig på tungt belastede gader og veje, herunder i kryds.

⁶ DA – drænasfalt er en asfaltbeton, hvis stemmateriale har en kornkurve, således at materialets enkelte hulrum er ret store og står i forbindelse med hinanden. Herved giver materialet mulighed for at vand kan drænes bort gennem belægningen. Denne egenskab er navnlig interessant i slidlag gennem overgangskurver på flade strækninger.

⁷ ABB – asfaltbinderbeton er en asfaltbeton til brug som binderlag.

⁸ GAB – grusasfaltbeton er en type af asfaltbeton (AB), hvis stenmateriale er uknust bakke- eller sømateriale. De tre 3 typer (GAB0, GAB1 og GAB2) adskiller sig ved og maksimal kornstørrelse og bitumenmængde. GAB anvendes overvejende til bærelag. Materialet kan i en kort periode tjene som slidlag, men skal afdækkes med egentligt slidlag inden fastsatte tidsrum, hvis afhjælpningsperioder og levetid skal gøres gældende.

Eksempel C

Et asfaltlag er 190 mm tykt. De øverste 100 mm antages at have E -værdien 3000 MPa; den resterende del antages at have E -værdien 5000 MPa.

Asfaltlagets vægtede E -værdi findes at være:

$$E_1 = \frac{100}{190} \cdot 3000 + \frac{90}{190} \cdot 5000 = 1579 + 2368 = 3947 \text{ MPa}$$

Hvis der er behov for en mere detaljeret vurdering af en asfaltbelægnings nedbrydningsforløb, bør E -værdiens store variation over årstiden inddrages i beregningerne, sådan som det sker i vejreglernes simuleringsmetode.

Korrektion ved lave hastigheder

Når hastigheden på vejstrækningen er lav, under 60 km/h, vil asfaltens visko-elastiske egenskaber medføre, at E -værdien i Tabel 6 ikke opnås. Tabellens værdier skal derfor reduceres. Under danske forhold og med almindelige danske asfaltmaterialer kan man, jævnfør vejreglerne (3), anvende følgende reduktionsfaktorer, F_E :

- Hastighed på 60 km/h og derover: $F_E = 1,0$
- Hastighed på 30 km/h: $F_E = 0,8$
- Hastighed på 10 km/h: $F_E = 0,5$
- Hastighed på 5 km/h: $F_E = 0,4$
- Hastighed på 2,5 km/h: $F_E = 0,3$

Tilladelige påvirkninger

Dimensioneringskriteriet i de bundne lag er, som nævnt, størrelsen af træktøjningen, ε , i lagets underside. For bitumenbundne belægningslag er kriteriet:

$$[11] \quad \varepsilon_h = -0,000250 \cdot \left(\frac{N_{\text{Æ10}}}{10^6} \right)^{-0,191}$$

Der ses her bort fra, at den tilladelige tøjning afhænger stærkt af asfaltens materialesammensætning, dvs. især af procentandel bitumen og den anvendte bitumens penetration.

Ved forstærkningsberegninger beregnes træktøjningen i undersiden af det gamle asfaltlag.

Eksempel D

En asfaltbelægning skal bære en trafiklast, $N_{\text{Æ10}}$, på 4600000 Æ10-aksler.

Den tilladelige træktøjning i asfaltlaget er:

$$\varepsilon_h = -0,000250 \cdot \left(\frac{4600000}{10^6} \right)^{-0,191} = -0,000250 \cdot 4,6^{-0,191} = -0,000250 \cdot 0,747 = -0,000187$$

Ved dimensioneringen skal asfaltlaget altså have materialeegenskaber og tykkelse, så denne træktøjning ikke overskrides.

Cementbundne og cementstabiliserede materialer**Elasticitetsegenskaber**

For beton sættes Poissons forhold, ν , normalt til 0,15. For cementstabiliseret grus (CG) sættes Poissons forhold, ν , normalt til 0,25.

| Tabel 7. Materialeparametre for cementbundne materialer. Efter (3). | Materiale | E-værdi [MPa] | Minimunstykkelse [mm] |
|--|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | Cementbeton, uarmeret | 35000 | 150 |
| Cementstabiliseret grus (CG), intakt lag (værkblandet) trykstyrke 10 MPa | 15000 | 150 | |
| Cementstabiliseret grus (CG), intakt lag (værkblandet) trykstyrke 8 MPa | 13000 | 150 | |
| Cementstabiliseret sand (CS), intakt lag (værkblandet) trykstyrke 6 MPa | 7000 | 150 | |

Tabel 8. Tilladelige påvirkninger for cementstabiliserede materialer. Efter (3).

| Materiale | Trykstyrke [MPa] | E_{INIT} [MPa] | E_{TERM} [MPa] | Kriterie |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|--|
| Cementstabiliseret grus (CG) | 10 | 15000 | 2000 | $\varepsilon_h = -0,000090 \cdot (N_{\varepsilon 10}/10^6)^{-0,125}$ |
| Cementstabiliseret grus (CG) | 8 | 13000 | 2000 | $\varepsilon_h = -0,000075 \cdot (N_{\varepsilon 10}/10^6)^{-0,139}$ |
| Cementstabiliseret sand (CS) | 6 | 7000 | 1000 | $\varepsilon_h = -0,000070 \cdot (N_{\varepsilon 10}/10^6)^{-0,213}$ |

De mest almindeligt forekommende cementbundne materialers E -værdi fremgår af Tabel 7. Materialerne er betegnet ved de forkortelser, der normalt anvendes. Tabellen angiver en minimumslagtykkelse, som er nødvendig, for at udlægning og efterbehandling af belægningslaget kan udføres forskriftsmæssigt.

Tilladelige påvirkninger

Dimensioneringskriteriet i de bundne lag er størrelsen af træktøjningen, ε , i lagets underside.

For et betonbelægningslag er kriteriet:

$$[12] \quad \varepsilon_h = -0,000041 \cdot \left(\frac{N_{\varepsilon 10}}{10^6} \right)^{-0,13}$$

For cementstabiliseret grus og sand er kriteriet afhængig af såvel start E -værdien, E_{INIT} , som af den nedbrydningsgrad, der accepteres ved dimensioneringsperiodens udløb. Nedbrydningsgraden kan angives ved materialets slut E -værdi, E_{TERM} .

De danske vejregler anvender værdier, der sikrer, at cementstabiliseret grus bevarer en bæreevne på mindst 1500 MPa, mens cementstabiliseret sand vil bevare en bæreevne, der ligger mellem skærvemakadams og singelsmakadams. Med disse værdier bliver kriterierne for de tilladelige påvirkninger som angivet i Tabel 8.

Ubundne materialer

Elasticitetsegenskaber

For de ubundne materialer gælder, at Poissons forhold, ν , normalt sættes til 0,35.

| Materiale | E-værdi [MPa] | Minimumstykkelse [mm] |
|---|---------------|-----------------------|
| Skærvemacadam (SKM) ¹ | 1000 | 70 |
| Singelsmacadam (SIM) ² | 600 | 70 |
| Stabilt grus (SG) ³ | 300 | 150 |
| Knust genbrugsbeton, kvalitet A (KGBA) | 400 | 150 |
| Knust genbrugsbeton, kvalitet B (KGBB) | 300 | 150 |
| Knust genbrugsbeton, kvalitet C (KGBC) | 200 | 150 |
| Knust genbrugsasfalt (KGA) | 300 | 150 |
| Knust tegl | 250 | 150 |
| Forbrændingslagge | 70 | 150 |
| Bundsikringslag, sand (BL) ⁴ | 100 | 200 |

¹ SKM – skærvemacadam er et stembærelag udført af skærver, dvs. stærke og vejrfaste bjergarter, uden indhold af flint, kalksten, sandsten, skiffer eller lignende. Mindst 80 % af skærverne skal være kubiske og alle skal have mindst en brudflade. Den nominelle kornstørrelse skal ligge i intervallet 32-64 mm. Stenmaterialet udlægges med overtykkelse og efterkomprimeres til det angivne mål.

² SIM – singelsmacadam er et ... stembærelag udført af singels, dvs. stærke og vejrfaste bjergarter med beskedent indhold af hård kalksten, sandsten og lignende, og med nominel kornstørrelse i intervallet 32-64 mm. Stenmaterialet udlægges med overtykkelse og efterkomprimeres til det angivne mål.

³ SG – stabilt grus er velgraderet, komprimeret grusmateriale med et minimum af hulrum.

⁴ BL – bundsikringsmateriale er grusmateriale med fornøden bæreevne, drænevne, frostsikkerhed, frostbestandighed, slidstyrke og filtervirkning mod finkortet underbund.

De mest almindeligt forekommende ubundne materialers E -værdi fremgår af Tabel 9. Materialerne er betegnet ved de forkortelser, der normalt anvendes. Tabellen angiver en minimumslagtykkelse, som er nødvendig, for at udlægning og efterbehandling af belægningslaget kan udføres forskriftsmæssigt.

For så vidt angår underbundens egenskaber henvises til Tabel 4.

Tilladelige påvirkninger

Dimensioneringskriteriet i de ubundne lag er, som nævnt, størrelsen af den lodrette trykspænding, σ_z , på de enkelte lags overflade. Kriteriet udtrykkes:

$$[13] \quad \sigma_z = 0,086 \cdot \left(\frac{E}{160}\right)^{1,06} \cdot \left(\frac{N_{\text{Æ}10}}{10^6}\right)^{-0,25}$$

hvor: E er lagets E -værdi [MPa]

Eksempel E

I en befæstelse, der skal bære en trafiklast $N_{\text{Æ}10}$, på 4600000 Æ10-aksler skal indgå et lag af singelsmakadam grus med E -modul 600.

Den tilladelige lodrette trykspænding på laget er:

$$\sigma_z = 0,086 \cdot \left(\frac{600}{160}\right)^{1,06} \cdot \left(\frac{4600000}{10^6}\right)^{-0,25} = 0,086 \cdot 4,06 \cdot 0,68 = 0,24 \text{ MPa}$$

Ved dimensioneringen skal de overliggende lag altså have materialeegenskaber og tykkelse, så denne trykspænding ikke overskrides.

Katalogbefæstelser

Katalogmetoden angiver standardforslag til opbygning af vejbefæstelser. Metoden består af tabeller, hvor indgangene er trafikklassen og befæstelsestypen, og hvor forslag til befæstelsens opbygning kan aflæses. Tabellerne forudsætter, at underbunden har en given beskaffenhed.

Tabel 10. Katalogbefæstelser med fleksible slidlag til 10 års trafik på frosttvivlsom underbund (40 MPa).

De anvendte belægningsbetegnelser er: AB: asfaltbeton (penetration 70/100); ABB: asfaltbinderbeton (penetration 40/60); BL: bundsikringslag; GAB: grusasfaltbeton (penetration 70/100); PA: pulverasfalt (penetration 250/330); SG: stabilt grus; SIM – singelsmakadam; SMA: skærvemakadam samt TB-k: tyndlagsbelægning.

Belægningslagenes tykkelser er angivet i mm. Efter (3).

| Befæstelse | Trafikklasse | | | | | |
|--------------|---------------------------|--------------------------------------|--|---|---|--|
| | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| Asfalt + SG | 30 PA 120 SG 150 BL | 20 PA 50 GAB0 150 SG 180 BL | 20 PA 80 GAB1 150 SG 250 BL | 25 PA 60 GAB0 60 GAB1 150 SG 305 BL | 25 PA 60 GAB0 90 GAB1 170 SG 355 BL | 30 AB 60 ABB 65 GAB1 215 SG 350 BL |
| | | | 25 AB 70 GAB0 150 SG 255 BL | 25 AB 50 GAB0 60 GAB1 150 SG 315 BL | 30 AB 60 GAB0 75 GAB1 160 SG 375 BL | 35 SMA 60 ABB 60 GAB1 215 SG 350 BL |
| | | | 15 TB-k 80 GAB1 150 SG 255 BL | 15 TB-k 60 GAB0 60 GAB1 150 SG 315 BL | 20 TB-k 60 GAB0 90 GAB1 170 SG 360 BL | 20 TB-k 65 ABB 75 GAB1 210 SG 330 BL |
| Asfalt + SIM | | 20 PA 100 SIM 280 BL | 40 PA 210 SIM 260 BL 315 BL | 25 PA 60 GAB0 200 SIM 370 BL | 30 AB 70 GAB0 230 SIM | |
| Asfalt + SKM | | 20 PA 100 SKM 280 BL | 20 PA 200 SKM 280 BL | 25 PA 240 SKM 335 BL | 30 AB 60 GAB0 200 SKM 410 BL | 30 AB 60 GAB0 250 SKM 360 BL |

Tabel 11. Katalogbefæstelser med betonbelægningssten til 10 henholdsvis 20 års trafik på frosttvivlsom underbund (40 MPa).

De anvendte belægningsbetegnelser er: AG: afretningsgrus; BL: Bundsikringslag; BBS: betonbelægningssten; CG: cementstabiliseret grus; CS: cementstabiliseret sand; GAB: Grusasfaltbeton (penetration 70/100) samt SG: Stabilt grus
Belægningslagenes tykkelser er angivet i mm. BBS-typerne er omtalt i teksten nedenfor. Efter (3).

Note: * - de anbefalede tykkelser stammer fra tyske katalogbefæstelser og overholder derfor ikke de normale, anbefalede danske minimumstykkelser.

| Befæstelse | | Trafikklasse | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|--------------|-----|-------|-----|-------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | | T0 | | T1 | | T2 | | T3 | | T4 | | T5 | |
| 10 års trafik | BBS-type | A-B-C | | A-B-C | | A-B-C | | A-B | | A | | A | |
| | 10 års trafik | BBS+SG | 60 | BBS | 60 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 90 |
| 30 | | | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG |
| 120 | | | SG* | 120 | SG* | 190 | SG | 240 | SG | 290 | SG | 330 | SG |
| BBS+CG | | 150 | BL* | 190 | BL* | 200 | BL | 250 | BL | 300 | BL | 250 | BL |
| | | 60 | BBS | 60 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 90 | BBS |
| | | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG |
| BBS+Asfalt | | 120 | CG | 135 | CG | 155 | CG | 175 | CG | 175 | CG | 210 | CG |
| | | 190 | BL* | 255 | BL | 335 | BL | 415 | BL | 415 | BL | 370 | BL |
| | | 60 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 90 | BBS |
| 20 års trafik | BBS+SG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG |
| | | 120 | SG* | 120 | SG* | 240 | SG | 270 | SG | 330 | SG | 370 | SG |
| | | 150 | BL* | 190 | BL* | 150 | BL* | 220 | BL | 260 | BL | 210 | BL |
| | BBS+CG | 60 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 90 | BBS |
| | | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG |
| | | 120 | CG | 155 | CG | 170 | CG | 195 | CG | 195 | CG | 230 | CG |
| | BBS+Asfalt | 190 | BL* | 235 | BL | 320 | BL | 395 | BL | 395 | BL | 350 | BL |
| | | 60 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 80 | BBS | 90 | BBS |
| | | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG | 30 | AG |
| BBS+Asfalt | 80 | GAB1 | 110 | GAB1 | 125 | GAB1 | 140 | GAB1 | 140 | GAB1 | 155 | GAB1 | |
| | 230 | BL | 280 | BL | 365 | BL | 450 | BL | 450 | BL | 425 | BL | |

Katalogbefæstelser med betonbelægningssten

De danske dimensioneringsvejregler (3) angiver, at befæstelser med betonbelægningssten (BBS) anvendes veje og pladser, hvor hastigheden er under 60 km/h.

Vejreglerne definerer betonbelægningssten således, at forholdet mellem længde og tykkelse højst må være 4 samtidig med at det samlede areal højst må være 1 m². Er disse kriterier ikke opfyldt, er der tale om fliser, som ikke er omfattet af katalogbefæstelserne.

Tabel 11 viser standardforslag til belægninger, hvor øverste lag er betonbelægningssten. Der er forudsat frosttvivlsom underbund, $E_m = 40$ MPa, og der er forudsat 10 henholdsvis 20 års trafik i trafikklasse T0-T5.

Tabellen angiver tykkelsen i mm af de enkelte belægningslag i befæstelsen. Belægningslagene er betegnet ved de forkortelser, der normalt anvendes.

Bemærk, at betonbelægningssten inddeles i tre klasser afhængigt af hvor godt stenene låser sig ind i hinanden, jævnfør Figur 19:

- **Type A** er fortandede sten, der griber ind i hinanden og derved modvirker bevægelser mellem stenene i såvel tvær- som længderetningen; typen kan anvendes ved alle trafikklasser T0-T5.
- **Type B** er fortandede sten, der griber ind i hinanden og derved modvirker bevægelser mellem stenene i én retning; typen kan anvendes ved alle trafikklasser T0-T3, forudsat at belægningen ikke er udsat for kraftigt drejende trafik.
- **Type C** er sten, der ikke har nogen låse-effekt; typen bør alene anvendes ved trafikklasser T0-T2, forudsat at belægningen ikke er udsat for kraftigt drejende trafik.

Figur 19. Eksempler på forskellige typer betonbelægningsten. Alle tre typer kan anvendes ved trafikklasse T0 og T1. Ved trafikklasse T2, kan type A og type B anvendes; mens alene type A bør anvendes ved trafikklasse T4 og T5. (3).



UDKAST

Dimensionering af befæstelsens lag

Ved den analytisk-empiriske dimensioneringsmetode bedømmes befæstelsens holdbarhed, dvs. den strukturelle bæreevne. Det forudsættes, at andre funktionskrav er opfyldt i befæstelsens levetid, enten fordi de pågældende egenskaber ikke nedslides i samme takt, eller fordi de fornyes undervejs.

Et eksempel herpå kunne være vejoverfladens friktionsegenskaber, der alene er knyttet til slidlaget. Flere slidlagstyper bidrager ikke direkte til den strukturelle bæreevne – om end befæstelsens bæreevne tilgodeses af, at slidlaget er tæt og hindrer nedsivning af vand – og slidlag fornyes oftest flere gange under selve befæstelsens levetid for at sikre, at vejen har gode overfladeegenskaber.

De belægningslag, som befæstelsen er opbygget af, har alle nogle styrkeegenskaber, der skal respekteres. I de bundne lag er der tale om evnen til at modstå vandrette træktøjninger, der optræder i lagenes underside; i de ubundne lag og underbunden er det evnen til at optage lodrette trykspændinger.

Dimensioneringsmetodens hovedkriterier er, at de analytisk bestemte aktuelle påvirkninger (spændinger og tøjninger) hidrørende fra det dimensionsgivende hjultryk og kontaktryk ikke må overstige de tilladelige påvirkninger, der beregnes ud fra nogle empiriske udtryk. Disse betingelser verificeres for normaltrykspændingerne ovenpå de ubundne bærelag henholdsvis på underbunden, samt for de vandrette bøjningstræktøjninger i undersiden af asfaltlagene, jævnfør Figur 20.

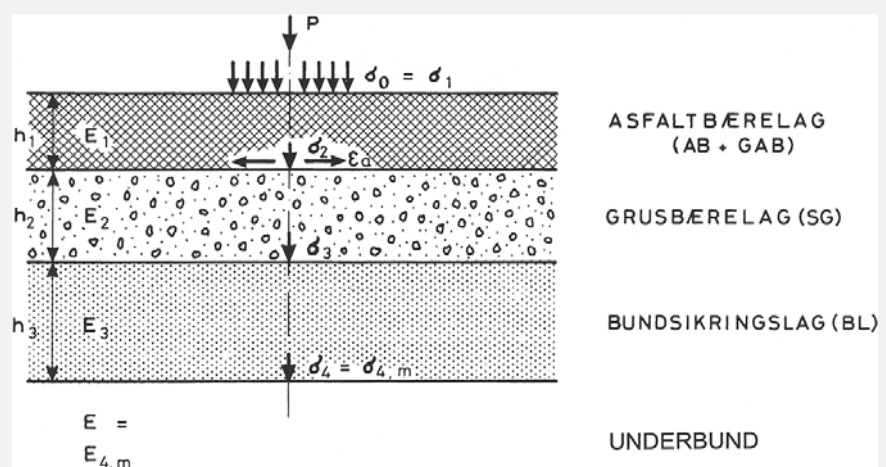
Forudsætninger for dimensioneringen

Der dimensioneres for påvirkningen af et hjultryk på vejens overflade. Hjultrykket forudsættes ensformigt fordelt over et cirkelformet kontaktareal mellem dækoverflade og vejoverflade.

Kontaktfladens radius, a [mm] er en væsentlig parameter i dimensioneringen. Den bestemmes, jævnfør formel [2]-[4] ud fra det dimensionsgivende hjultryk P [kN] og det dimensionsgivende kontaktryk, σ_0 [MPa].

Hjultrykket P sættes lig halvdelen af det maksimalt tilladelige akseltryk A , der som tidligere nævnt forhøjes med et stødtillæg på 20 %.

Figur 20. Spændingsvariation ned gennem vejbefæstelsen. Hjultrykket P giver anledning til et kontaktryk $\sigma_0 = \sigma_1$ over kontaktfladen med radius a . Ved dimensioneringen skal det sikres, at den vandrette tøjning, ε_v , en i asfaltlagets underside holder sig under det tilladelige, og af de lodrette trykspændinger på grusbærelaget, σ_2 , på bundsikringslaget, σ_3 , og på underbunden, $\sigma_4 = \sigma_{mv}$ ligeledes alle holder sig under det tilladelige.



Det dimensionsgivende kontaktryk er i de danske vejregler sat til $\sigma_0 = 0,70 \text{ MPa}$.¹

Relationen mellem a , P og σ_0 vil – under forudsætning af et cirkelformet kontaktareal – være:

$$[14] \quad P = \sigma_0 \cdot \pi \cdot a^2$$

For $(P; \sigma_0) = (60 \text{ kN}; 0,70 \text{ MPa})$ findes derfor, at kontaktflades radius sættes til $a = 165 \text{ mm}$.²

Trykspredning

Bestemmelsen af de aktuelle påvirkninger, træktøjninger og tykspændinger, i en vejbefæstelse, hviler på analytiske betragtninger. Den virkelighed, der regnes på, er langt fra ideal, og den opfylder langt fra de teoretiske idealforudsætninger, der gør det muligt at opstille enkle analytiske modeller.

Eksempelvis er den teoretiske forudsætning normalt, hvis der er tale om asfaltbelægninger, at materialerne er lineærelastiske dvs. følger Hookes lov. Dette er langt fra tilfældet i praksis. Elasticitetskoefficienterne er stærkt spændingsafhængige, dvs. at arbejdskurverne er krumme. Endvidere er det kun asfaltbærelag, der til en vis grad er bøjningsstive, så de kan optage trækspændinger. Ubundne lag (blandt andet grusbærelag) har ikke denne egenskab. Deformationsegenskaberne er endvidere temperatur- og fugtighedsafhængige og varierer derfor stærkt over året.

De E -værdier, der bruges til at karakterisere det enkelte materiale anvendes (i overensstemmelse med de teoretiske forudsætninger) kan betragtes som grove, regningsmæssige størrelser, der angiver en form for gennemsnitsværdi af elasticitetsegenskaberne års- og belastningsvariation.

På trods af de grove teoretiske forudsætninger, giver den analytisk-empiriske dimensioneringsmetode i de fleste tilfælde rimelige, praktiske resultater. Metoden bygger såvel på nogle teoretiske som på et praktisk erfaringsgrundlag, der tager hensyn til danske materialetraditioner og til de trafikale og klimatiske betingelser i Danmark.

Teoretiske forudsætninger

De udtryk, der i det følgende angives til beregning af de aktuelle (karakteristiske) spændinger og tøjninger i en vejbefæstelse, tager udgangspunkt i de formler, som Boussinesq³ har udviklet under nogle elasticitetsteoretiske forudsætninger. Boussinesq's formler er tillempet et lagdelt system ved hjælp af Kirks⁴ og Odemark⁵s tilnærmelsesformler for »ækvivalente tykkelser«.

Spændingsfordeling efter Boussinesq

Der forudsættes et homogent, lineærelastisk og isotropt materiale i et uendeligt halvrum.

Vi ser på spændingstilstanden i et vilkårligt punkt i belægningen. Punktet ligger i den lodrette dybde h og den vandrette afstand r fra angrebepunktet for en lodret enkeltkraft Q , der virker på vejoverfladen, jævnfør Figur 21.

¹ Da der i praksis tillades der væsentlig større dæktryk, blandt andet i forbindelse med den øgede anvendelse af supersingledæk, kan man – i kombination med det forhøjede akseltryk på 11,5 tons – argumentere for, at der bør dimensioneres for et kontaktryk på $\sigma_0 = 0,90 \text{ MPa}$.

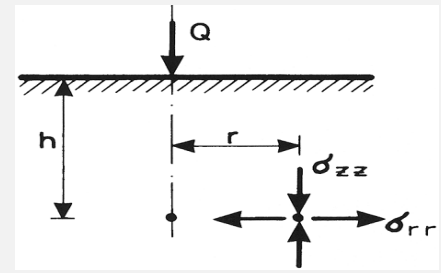
² Anvendes i stedet forudsætningerne $(P; \sigma_0) = (70 \text{ kN}; 0,90 \text{ MPa})$ findes kontaktfladens radius til $a = 157 \text{ mm}$.

³ Joseph Valentin Boussinesq (1842-1924), fransk matematiker og fysiker.

⁴ Jes Mogens Kirk (1918-??), dansk civilingeniør.

⁵ N. Odemark (xxxx-xxxx), svensk ...

Figur 21. Spændingsbetegnelser for lodret enkeltkraft Q . I afstanden r fra kraftens angrebepunkt vil der i dybden h under overfladen optræde en lodret trykspænding, σ_{zz} , og en vandret trækspænding, σ_{rr} .



Ifølge Boussinesq fås herefter følgende teoretiske udtryk for den vertikale normaltrykspænding σ_{zz} i det vilkårlige punkt:

$$[15] \quad \sigma_{zz} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}}$$

Et tilsvarende, men mere kompliceret, udtryk fås for den horisontale radialsplænding (bøjnings-trækspænding) σ_{rr} .

Lodrette normaltrykspændinger

Det antages nu, at det dimensionsgivende hjultryk P påvirker overfladen via en elastisk plade med en énsformigt fordelt normaltrykspænding σ_0 (= kontaktrykket mellem dæk og vejoverflade). Endvidere forudsættes spændingen som tidligere nævnt fordelt over en cirkelformet belastningsflade med radius a .

Herefter fås for en tynd "ring" af belastningsfladen, jævnfør Figur 22:

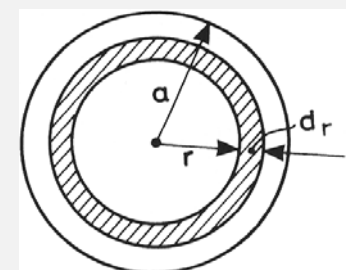
$$[16] \quad Q = \sigma_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$$

Der indføres følgende størrelser:

- Poissons forhold, ν
- Vertikalsplændingen, σ_h , i dybden h midt under den cirkulære, énsformigt fordelte belastning
- Den lodrette tøjning, ε_h , i samme punkt
- Den vandrette radialsplænding, $\sigma_{r,h}$, i samme punkt
- Den vandrette bøjningstræktøjning, $\varepsilon_{r,h}$, i samme punkt
- Materialets E -værdi

I en given dybde h under overfladen optræder den største normaltrykspænding σ_h og den største vandrette bøjningstrækspænding (radialsplænding) $\sigma_{r,h}$ midt under belastningsfladen, jævnfør Figur 15 og Figur 23.

"Ringarealets" bidrag til σ_h fås ved at indsætte udtrykket i [16] for Q i formel [15].

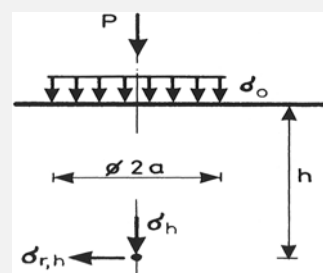


Figur 22. Forudsætning om cirkelformet belastningsflade.

En tynd ring af kontaktfladen, beliggende i afstanden r fra enkeltkraftens angrebepunkt, bidrager med kontaktrykket, σ_0 , multipliceret med ringens areal, eller i alt $\sigma_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$.

Figur 23. Spændingsbetegnelser midt under belastningsfladen.

Hjultrykket P fordeles gennem kontaktrykket σ_0 over det cirkulære kontaktareal med radius a . I dybden h optræder, midt under kontaktarealet, den lodrette trykspænding σ_h og den vandrette trækspænding $\sigma_{r,h}$.



Herefter bestemmes den lodrette trykspænding σ_h i dybden h midt under belastningsfladen ved polær integration over det cirkelformede areal:

$$[17] \quad \sigma_h = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \sigma_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_0^a \frac{r}{\left[1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot dr = 3 \cdot \sigma_0 \cdot \int_0^a \frac{\frac{r}{h}}{\left[1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot d\left(\frac{r}{h}\right)$$

Benyttes substitutionen $u = r/h$, fås:

$$[18] \quad \sigma_h = 3 \cdot \sigma_0 \cdot \int_{r=0}^{r=a} \frac{u}{\left[1 + (u)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot d(u) = 3 \cdot \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \int_{r=0}^{r=a} \frac{d(1+u^2)}{\left[1 + (u)^2\right]^{\frac{5}{2}}} = 3 \cdot \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{-2}{3} \cdot \left[(1+u^2)^{-\frac{3}{2}} \right]_{r=0}^{r=a}$$

hvoraf

$$[19] \quad \sigma_h = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Den tilsvarende, lodrette tøjning, ε_h , midt under belastningsfladen kan udledes til:

$$[20] \quad \varepsilon_h = \frac{(1+\nu) \cdot \sigma_0}{E} \cdot \left[\frac{\frac{h}{a}}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} - (1-2 \cdot \nu) \cdot \left[\frac{\frac{h}{a}}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \right]$$

Vandrette radialsplændinger og -tøjninger

I lighed med udtrykket for σ_h (formel [19]) kan der under de samme teoretiske forudsætninger udledes en tilsvarende formel for den vandrette radialsplænding (bøjningstrækspænding), $\sigma_{r,h}$, i dybden h midt under belastningsfladen, som funktion af σ_0 , ν , a og h . Udtrykket fås til:

$$[21] \quad \sigma_{r,h} = \sigma_0 \cdot \left[\frac{(1+2 \cdot \nu)}{2} - \frac{(1+\nu)}{\left[1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{2 \cdot \left[1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Da der er tale om en treakset spændingstilstand, og der er rotationssymmetri omkring en lodret akse midt gennem belastningsfladen, fås:

$$[22] \quad E \cdot \varepsilon_{r,h} = \sigma_h - 2 \cdot \nu \cdot \sigma_{r,h}$$

Dette udtryk kan omskrives til:

$$[23] \quad \varepsilon_{r,h} = \frac{1}{E} \cdot \left[\frac{1-\nu}{2 \cdot \nu} \cdot (\sigma_h - E \cdot \varepsilon_h) - \nu \cdot \sigma_h \right]$$

I det følgende beregnes $\varepsilon_{r,h}$ imidlertid på grundlag af et tilsvarende udtryk for krumningen i dybden h under overfladen (jævnfør formel [32]), da denne fremgangsmåde er mere bekvem i forbindelse med benyttelse af »ækvivalente tykkelsers metode«.

Spændinger og tøjninger i et lagdelt system

Vejbefæstelsen består ikke af et halvuendeligt rum, således som det er forudsat i det foranstående. I stedet består befæstelsen af et antal lag af givne tykkelser. Befæstelseslagene har også en begrænsning på tvær af vejen. I det efterfølgende betragtes punkter så langt inde på vejen, at betydningen af tværsnitsbredden kan negligeres. Det bemærkes dog, at der er særlige problemer med kantbæreevne og sidestøtte, når tunge kørekøjer færdes med et hjulsæt nær kørebanekanten.

For at regne på det lagdelte system i en vejbefæstelse ækvivaleres lagene i matematisk-fysisk henseende med et homogent materiale ved hjælp af den af Kirk og Odemark opstillede **ækvivalente tykkelsers metode**.

Generelt forudsætter ovennævnte empiriske formler for de tilladelige påvirkninger, at den samlede nedbrydning er uafhængig af $\text{Æ}10$ -lastens fordeling over dimensioneringsperioden.

Den aktuelle spændingsfordeling og den vandrette bøjningstræktøjning i asfaltlagets underside beregnes nedenfor under den forudsætning, at der er tale om lineærelastiske og isotrope materialer.

Virkeligheden afviger givetvis en hel del fra de teoretiske forudsætninger, hvad spændings- og tøjningsfordelingen angår. Men anvendelsen af den analytiske beregningsmetode med en forudsætning om lineærelastiske materialer synes at give praktisk anvendelige resultater.

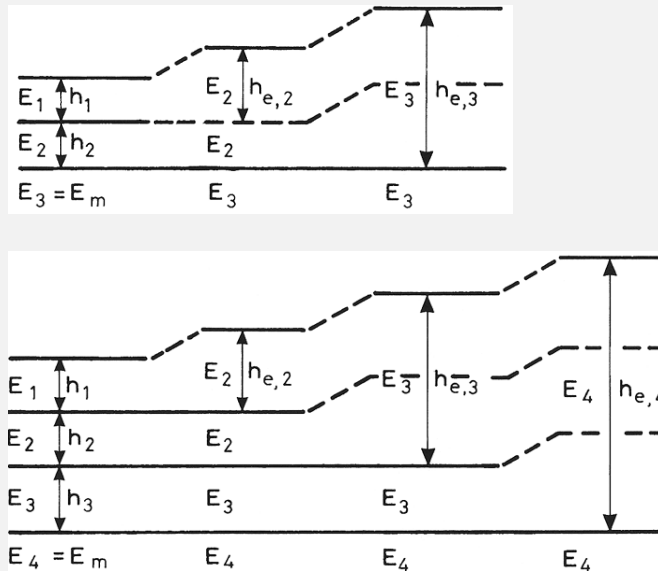
Det er muligt at arbejde med materialer, der opfører sig non-lineart. Det kræver, at man indarbejder en forudsætning om krum arbejdskurve dvs. en spændingsafhængig E -værdi. Dette medfører nogle endnu mere komplicerede formeludtryk, jævnfør (9).

Da der er tale om relativt små deformationer i vejbelægningen som følge af belastningen fra et hjultryk, vil den forudsatte tilnærmelse til rent lineærelastiske vejmaterialer ikke være helt urimelig.

På tilsvarende måde arbejdes der med også at inddrage en beskrivelse af materialernes plastiske egenskaber i modellerne.

Figur 24. Transformation til ækvivalente lagtykkelser i et trelags-system (øverst) henholdsvis i et firelags-system (nederst).

Det øverste lags tykkelse ækvivaleres først, svarende til det næstøverste lags E -værdi. Derefter ækvivaleres de to øverste lags tykkelse svarende til det tredjeøverste lags E -værdi; osv.



De ækvivalente lagtykkelser

I de fleste praktiske tilfælde kan fleksible belægninger, der har et asfaltbærelag øverst, ækvivaleres med et trelags-system (asfaltlag + grusbærelag + underbund) eller et firelags-system (asfaltlag + grusbærelag + bundsikringslag + underbund).

En forudsætning for at anvende de ækvivalente tykkelses metode er, at E -værdierne i det lagdelte system er aftagende oppefra og ned.

Med det formål at beregne normaltrykspændingen efter formel [19] ovenpå et bærelag med E -værdien E_{nedre} , indføres en **forøget ækvivalent lagtykkelse** h_e for det øvre bærelag med tykkelsen h og E -værdien $E_{øvre}$ efter formlen:

$$[24] \quad h_e = f \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{øvre}}{E_{nedre}}}$$

Her er f en korrektionsfaktor, der skal sikre, at de beregnede spændinger bliver i overensstemmelse med spændingerne beregnet efter elasticitetsteorien i det virkelige, lagdelte system.

Figur 24 illustrerer den trinvis transformation til ækvivalente lagtykkelser for henholdsvis et trelags-system og et firelags-system.

Formlerne for de ækvivalente tykkelser i det følgende har som forudsætning, at Poissons forhold, ν , sættes til 0,35 for alle materialerne, hvor ν ikke indgår specifikt i formlerne.

Den ækvivalente tykkelse af lag 1 (asfaltlaget) ovenpå lag 2 (det ubundne bærelag) bliver:

$$[25] \quad h_{e,2} = f_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$$

hvor:

$$[26] \quad f_1 \approx 0,99 - 0,07 \cdot \frac{h_1}{a}$$

Eksempel F

Et asfaltlag med tykkelse $h_1 = 190$ mm og med resulterende E -værdi $E_1 = 3947$ MPa ligger oven på et lag af singelsmakadam (SIM) med E -værdi $E_2 = 600$ MPa.

Når befæstelsen skal dimensioneres for et hjultryk på $P = 60$ kN og et kontaktryk på $\sigma_0 = 0,70$ MPa, vil kontaktflades radius være $a = 165$ mm, jævnfør ovenfor.

Korrektionsfaktoren beregnes til:

$$f_1 = 0,99 - 0,07 \cdot (190/165) = 0,99 - 0,08 = 0,91$$

Asfaltlagets ækvivalente tykkelse kan herefter beregnes til:

$$h_{e,2} = 0,91 \cdot 190 \cdot \sqrt[3]{\frac{3947}{600}} = 0,92 \cdot 160 \cdot 1,87 = 323 \text{ mm}$$

Den ækvivalente tykkelse af lag 1 + lag 2 ovenpå lag 3 (underbunden) i trelags-systemet eller ovenpå bundsikringslaget i firelags-systemet bliver:

$$[27] \quad h_{e,3} = f_2 \cdot (h_{e,2} + h_2) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_{3,m}}} = f_2 \cdot \left(f_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_{3,m}}}$$

hvor der for et trelags-system gælder:

$$[28] \quad f_2 \approx 0,76 - 0,24 \cdot \frac{E_{3,m}}{E_2}$$

og hvor der for et firelags-system gælder:

$$[29] \quad f_2 \approx 1,04 - 0,176 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_2}{E_3} \right)$$

For firelags-systemet fås yderligere, at den ækvivalente tykkelse af lag 1 + lag 2 + lag 3 ovenpå lag 4 (underbunden) bliver:

$$[30] \quad h_{e,4} = f_3 \cdot [h_{e,3} + h_3] \cdot \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_{4,m}}} = f_3 \cdot \left[f_2 \cdot \left(f_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + h_3 \right] \cdot \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_{4,m}}}$$

hvor:

$$[31] \quad f_3 \approx 0,96 - 0,176 \cdot \log_{10} \left(\frac{E_3}{E_{4,m}} \right)$$

Det skal understreges, at de anførte korrektionsfaktorer (f_1 , f_2 og f_3) kun sikrer en overensstemmelse med elasticitetsteorien anvendt for et lagdelt system. Det er som nævnt ikke givet, at resultatet svarer til de reelle spændings- og deformationsforhold i den virkelige vejbelægning.

Endvidere påpeges, at de angivne tilnærmede formeludtryk for korrektionsfaktorerne løbende ændres i takt med nyere erfaringer og med indførelse af belægningstyper med andre materialegenskaber.

Beregning af normaltrykspændinger

I takt med, at de ækvivalente lagtykkelser bestemmes, kan normaltrykspændingerne på det underliggende lags overflade, henholdsvis på planum, bestemmes af formel [19].

Eksempel G

Et asfaltlag med tykkelse $h_1 = 190$ mm og med resulterende E -værdi $E_1 = 3947$ MPa ligger oven på et lag af singelsmakadam (SIM) med E -værdi $E_2 = 600$ MPa.

Befæstelsen dimensioneres for et hjultryk på $P = 60$ kN og et kontaktryk på $\sigma_0 = 0,70$ MPa, hvorfor kontaktflades radius er $a = 165$ mm.

Asfaltlagets ækvivalente lagtykkelse beregnes til $h_{e,2} = 323$ mm.

Normaltrykspændingen på singelsmakadamlagets overflade beregnes til:

$$\sigma_2 = 0,70 \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{165}{323} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right) = 0,70 \cdot 0,29 = 0,20 \text{ MPa}$$

Vurdering: Den fundne normaltrykspænding på singelsmakadamlaget er mindre end den tilladte ($\sigma_{2,till} = 0,24$ MPa, jævnfør *Eksempel E*).

Tøjningen i asfaltlagets underside

Beregningen af den aktuelle (karakteristiske) bøjningstræktøjning i undersiden af asfaltlaget kan ske med udgangspunkt i Figur 25. Asfaltlagets samlede tykkelse, h_1 , er opgjort inklusive slidlag af asfaltbeton (AB) eller tilsvarende asfalttyper, men eksklusive slidlag af pulverasfalt (PA), overfladebehandling (OB) og tilsvarende.

Når R er den teoretiske krumningsradius ved asfaltlagets underside, bliver formeludtrykket for bøjningstræktøjningen ε_a i asfaltlagets underside:

$$[32] \quad \varepsilon_a = \varepsilon_{r,h} = \frac{h_1}{2 \cdot R}$$

Under de tidligere anførte forudsætninger, og ved udnyttelse af ækvivalente tykkelsers metode, kan der udledes følgende udtryk for krumningsradius:

$$[33] \quad R = E_2 \cdot \frac{a}{(1-\nu^2) \cdot \sigma_0} \cdot \frac{\left[1 + \left(\frac{h_e}{a} \right)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}{\left[1 + \left(1 + \frac{3}{2 \cdot (1-\nu)} \right) \cdot \left(\frac{h_e}{a} \right)^2 \right]}$$

Den ækvivalente lagtykkelse, h_e , bestemmes her af den efterfølgende formel [34], der tager udgangspunkt i formel [24], idet der benyttes en anden korrektionsfaktor f_ε til indsættelse i formel [34] end den tidligere angivne f_t der blev benyttet i formel [25], jævnfør nedenfor:

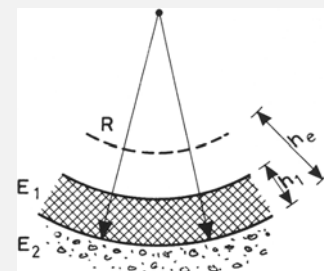
$$[34] \quad h_e = f_\varepsilon \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$$

hvor:

$$[35] \quad \begin{aligned} f_\varepsilon &\approx 0,96 + 0,73 \cdot \frac{a}{h_1} \cdot \frac{E_2}{E_1} && \text{for } \frac{h_1}{a} \cdot \frac{E_1}{E_2} \leq 10 \\ f_\varepsilon &\approx 1,13 - 0,0565 \cdot \ln \left[\left(\frac{h_1}{a} \right)^2 \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \right] && \text{for } \frac{h_1}{a} \cdot \frac{E_1}{E_2} > 10 \end{aligned}$$

Figur 25. Krumningsradius for asfaltlagets underside. h_1 er asfaltlagets samlede tykkelse, h_e er lagets ækvivalente tykkelse, og R er den teoretiske krumningsradius ved asfaltlagets underside.

Da materialet antages at være lineærelastisk, vil den vandrette trykspænding i asfaltlagets overflade være numerisk lige så stor som trækspændingen i lagets underside. Da $R \gg h_1$, bliver tøjningen derfor $1 - ((2 \cdot \pi \cdot (R+h_1)) / (2 \cdot \pi \cdot (R+\frac{1}{2} \cdot h_1))) = \pi \cdot h_1 / (2 \cdot \pi \cdot (R+\frac{1}{2} \cdot h_1)) \approx h_1 / (2 \cdot R)$.



Også for korrektionsfaktoren f_ε gælder det, at de anførte formeludtryk kan ændre sig i takt med nyere erfaringer og nye asfalttyper.

Eksempel H

Et asfaltlag med tykkelse $h_1 = 190$ mm og med resulterende E -værdi $E_1 = 3947$ MPa ligger oven på et lag af singelsmakadam (SIM) med E -værdi $E_2 = 600$ MPa.

Befæstelsen dimensioneres for et hjultryk på $P = 60$ kN og et kontaktryk på $\sigma_0 = 0,70$ MPa, hvorfor kontaktflades radius er $a = 165$ mm.

Da

$$\frac{h_1}{a} \cdot \frac{E_1}{E_2} = \frac{190}{165} \cdot \frac{3947}{600} = 7,6 \leq 10$$

findes korrektionsfaktoren

$$f_\varepsilon \approx 0,96 + 0,73 \cdot \frac{165}{190} \cdot \frac{600}{3947} = 1,06$$

Asfaltlagets ækvivalente tykkelse bestemmes af udtryk [34] til:

$$h_e = 1,06 \cdot 190 \cdot \sqrt[3]{\frac{3947}{600}} = 377 \text{ mm}$$

Krumningsradius i singelsmakadamlagets overflade bliver, idet $\nu = 0,35$:

$$R = 600 \cdot \frac{165}{(1 - 0,35^2) \cdot 0,70} \cdot \frac{\left[1 + \left(\frac{377}{165}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}}{\left[1 + \left(1 + \frac{3}{2 \cdot (1 - 0,35)}\right) \cdot \left(\frac{377}{165}\right)^2\right]} \approx 850000 \text{ mm}$$

Tøjningen i asfaltlagets underside bestemmes til:

$$\varepsilon_a = \frac{190}{2 \cdot 850000} = 0,000112$$

Vurdering: Den fundne tøjning i asfaltlagets underside er mindre end den tilladelige ($\varepsilon_{a,till} = 0,000187$, jævnfør *Eksempel D*). Værdien er imidlertid så meget mindre, at der er grund til at søge at optimere befæstelsesopbygningen.

Projektering af detaljer

Udbudsmateriale

De dimensionerede vejbefæstelser udbydes, således at entreprenørerne kan afgive sammenlignelige tilbud på at udføre arbejdet. Udbudsmaterialet udarbejdes på grundlag af de udbudsforskrifter, der udsendes i vejregelregi.¹ Herved sikrer man sig, at de produktions- og udførelsesmæssige forudsætninger, der er lagt til grund for dimensioneringsmetoden, også bliver medtaget i aftalegrundlaget for arbejdet.

Ved udfærdigelse af udbudsmaterialet bør man som bruger navnlig være opmærksom på udbudsforskrifternes vejledninger og på de generelle bestemmelser for kvalitetsstyring samt miljø- og arbejdsmiljøledelse. Blandt andet rummer vejledningerne en række forudsætninger og anvisninger om brugen af udbudsforskrifterne.

Afgrænsninger og detaljer

Det vil ofte være nødvendigt at tage stilling til og detaljeret beskrive, hvordan visse detaljer skal udformes – ikke så meget i forbindelse med færdselsarealerne for den kørende trafik, men derimod, hvor der er fx æstetiske forventninger til gangarealer og til forskellige færdselsarealer indbyrdes afgrænsning. I det omfang der lægges vægt på, hvordan disse detaljer udformes, bør udformningen fremgå af udbudsmaterialets beskrivelser og/eller ledsagende tegninger.

Nedenstående er en omtale af nogle punkter, hvor sådanne hensyn kan optræde.

Rendesten mv.

Mellem kørebanen og fortov eller evt. cykelsti løber rendestede. I reglen er de afgrænset af kantsten med en vis lysning. Højdespringet har flere funktioner. Ud over at lede overflade vand til nedløbsriste giver det signal til synshandicappede om, at man bevæger sig til et areal, der har en anden funktion.

Kantsten udføres i beton og granit. Sidstnævnte fås kløvede eller fashuggede.

Det ældre rendestensprofil med revier- og forbundtplaner kan stadig ses enkelte steder.

Færdselsarealer i byområder har i øvrigt oftest en veldefineret afgrænsning. Fx indfattes en asfalteret sti i eget tracé typisk af brostensrækker. Mellem fortovsfliser og husfacader udfyldes med fx tilskårne fliser, chaussésten eller pigsten.

Færdselsarealer i samme plan kan endvidere adskilles ved at omkranse dem med et bånd med et afvigende materiale eller ved at bruge forskellige farver. Det gælder såvel brolagte som asfalterede arealer.

Afslutninger, retningsændringer og overgange

Hvor en belægning slutter, kræver formgivningen ekstra opmærksomhed. Afbrydes den uden videre, vil resultatet i reglen se ufærdigt ud.

Det samme gælder, hvor en belægning med mønster ændrer retning. Et flisefortov ved et gadehjørne er en udfordring om ordentligt design og gode håndværksmæssig udførelse. Kan fliserækkerne drejes rundt om hjørnet, vil det i reglen være en rigtig løsning.

Også hvor to belægninger mødes, kræver formgivningen ekstra opmærksomhed. Det gælder overgange i såvel længde som tværretningen. Det kan være, hvor et fortov indsnævres fra tre til to rækker fliser, eller hvor en overkørsel passerer fortov og cykelsti.

¹ Udbudsforskrifterne kan findes på www.udbudsforskrifter.dk.

Døre og porte

Døre og porte fra tilstødende ejendomme kræver særlig opmærksomhed ved projektering.

Til porte skal der være niveaufri adgang for kørende. Også til døre skal tilstræbes niveaufri adgang af hensyn til bevægelseshandicappede. Det stiller ofte store udfordringer til bearbejdningen af et projekts koteplan. Og det kan være nødvendigt med snævert samarbejde med et byggeris rådgivere.

Niveauforskelle bør overvindes på den enkelte matrikel, ikke på det offentlige vejareal. Hvor dette ikke er muligt, og det bliver nødvendigt at placere trappesten på gadearealer, skal det sikres, det der levnes forbi passerende tilstrækkelig plads på fortovet.

Lyskasser i fortovsarealer forsynes med riste, der kan bære færdslen. Ved projektering skal det sikres, at afvandingen sker væk fra lyskasser.

Klipning dæksler

Mange af de detailhensyn, der er nævnt ovenfor, indebærer, at fliser og belægningssten skal klippes til. Det er selvfølgelig en opgave for den dygtige brolægger, men allerede ved projekteringen bør der tænkes herpå, når detailudformningen sker.

Fliser bør ikke klippes, så de bliver mindre end 50 %. Bliver de mindre, går det ud over styrken i belægningen. Og visuelt får belægningen præg af et puslespil.

Fliser bør ikke klippes, så de ender i vinkler, der er mindre end 45-60°. Den spidse vinkler bør så vidt muligt ikke lægges i belægningens yderside, hvor der har stor risiko for at knække af.

Fliser bør normalt ikke klippes konkavt (med indadgående hjørner), og der bør aldrig accepteres udsparinger midt i en flise.

Dæksler bør placeres, så de giver mindst muligt indgreb i belægningen. Hvor excentriske brøndkegler kan dreje et dæksel på plads i en fliserække, bør man benytte sig af denne mulighed. Dæksler kan indfattes i en jernplade af samme dimensioner som fortovsfliser, eller de kan omkranses af en chausséstensflade.

Bibliografi

1. **Vejreglerådet.** *Vej- og trafikteknisk ordbog.* København : Vejdirektoratet, 2004. Vejregel.
2. **Berg, Flemming.** Nye vejregler for stabilt grus og bundsikring. *Dansk Vejtidskrift.* 4, 2004, s. 22-25.
3. **Vejreglerådet.** *Vejregel. Dimensionering af befæstelser og forstærkningsbelægninger.* København : Vejdirektoratet, 2007. ISBN 87-7923-930-5 / ISSN 1600-006X.
4. **Vejreglarbejdsgruppe P.21.** *Vejregel. MMOPP Dimensioneringsprogram for vejbefæstelser. Brugervejledning.* København : Vejdirektoratet, 2007. ISBN 87-7923-930-5 / ISSN 1600-006X.
5. **Vejreglerådet.** *Vejregel. Veligehold af færdselsarealet.* København : Vejdirektoratet, 2009. ISBN 978-87-7060-352-2 / ISSN 1600-006X.
6. **Færdselsstyrelsen.** *Bekendtgørelse om køretøjers største bredde, længde, højde, vægt og akseltryk.* København : Transportministeriet, 2007. BEK nr 657 af 19/06/2007.
7. **NCC.** *Vejbygning.* s.l. : NCC, 2001. ISBN 87-984200-0-3.
8. **Thagesen, Bent.** *Veje og Stier.* Lyngby : Polyteknisk Forlag, 1998. ISBN 87-502-0804-7.
9. **Ullidtz, Per.** *Modelling Flexible Pavement Responce and Performance.* Lyngby : Polyteknisk Forlag, 1998. ISBN 87-502-0805-5.
10. **Justitsministeriet.** *Færdselsloven.* København : Justitsministeriet, 2009. LBK nr 984 af 05/10/2009.
11. **Transport and Road Research Laboratory (TRRL).** *The Structural Design of Bituminous Roads.* s.l. : Transport and Road Research Laboratory, 1984. TRRL Laoratory Report 1132.
12. **Dawson, Andrew.** *Water in Road Structures - Movement, Drainage and Effects.* s.l. : Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8561-1.
13. **Vejregeludvalget.** *7.10.03 - Vejregler for dimensionering af befæstelser.* København : Vejdirektoratet, 1984. ISBN 87-7491-121-7 - ISSN 0106-9772.
14. **Ashworth, R.** *Highway Engineering.* London : Heinemann Educational Books Ltd., 1972.
15. **Nielsen, Steen.** *Nye formler for σ og ϵ i flerlagssystemer med Poissonforhold $\nu = 0,35$.* Roskilde : Statens Vejlaboratorium, 1984. Notat 162.