

Hoe goed is de huidige kennis van de techniek?

Fedde Tolman
KOAC-NPC

Samenvatting

Twijfels aan de huidige technische kennis zijn de laatste jaren in zeer algemene verwoordingen een regelmatig terugkerend onderwerp, in het nieuws gebracht door overheid, bedrijven en opleidingsinstellingen. Als voornaamste oorzaken zijn o.a. te noemen

- Voor het maken van ontwerpen is steeds meer en lastiger te doorgronden software beschikbaar.
- De kennis en vaardigheden van ingenieurs verschuift van technische naar organisatorische.
- De huidige contracten zijn vaak DC, zelfs verschuivend van min of meer functionele vraagspecificaties naar budgetsturing.

Deze 3 oorzaken leiden ertoe dat het beoordelen van ontwerpen steeds belangrijker wordt, maar door deze zelfde oorzaken ook onder druk staat.

In dit artikel wordt deze problematiek iets verder uitgesponnen en enige voorbeelden gegeven hoe de ‘oude’ ingenieurskunde (zoals handmatig controleren en interpreteren van ontwerpberoeeningen) eruit kan zien. De achterliggende vraag hoeveel garen er bij deze kunde gesponnen wordt is in zijn algemeenheid niet te beantwoorden en moet van geval tot geval beschouwd worden.

Inhoud

Inleiding	2
Het probleem	2
Eisen aan berekeningen	4
Liggerbenadering van een ondersteunde plaat	4
Probleemstelling	4
Buigligger	5
Overlaging	6
Probleemstelling	6
Elementenberekening	7
Buigligger	8
Afschuifligger	9
Scheurvorming	10
Stellingen	10
Referenties	11

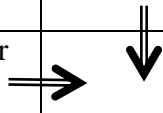
Inleiding

Het lijkt van alle generaties te zijn, dat de oudere wijst op ernstig tekortschieten in de vakkennis van de jongere. Dat inzicht ligt enerzijds natuurlijk erg voor de hand. Kennis is modieus en wordt afgeschreven, maar niet altijd terecht. Meer tijdgebonden lijkt het, dat er nu ook vrij grote unanimiteit in deze klacht te bespeuren is bij universiteiten, scholen en vakopleidingen, bedrijven en in de politiek. Was in het verdere verleden de kwestie dat de toename van de rekenmiddelen de technische kennis ondersneeuwde, recenter is dat de eenzijdige belangstelling voor het management in de techniek daar debet aan is. Als derde is daaraan toe te voegen dat de verandering in contractvormen inhoudelijke kennis bij beide contractpartijen vergt. Dit lijkt controversieel, want waren deze contractvormen nu niet juist bedoeld om de technische kennis te scheiden van het nut van een product voor de opdrachtgever zodat vakinhoudelijke kennis niet bij hem hoeft te zijn. In de praktijk blijkt dit niet zo eenvoudig te liggen, omdat de aanvaarding van het geleverde wel eens op moeilijker ligt dan idealiter voorspeld wordt, zodat de opdrachtgever zijn kennis ad hoc uitbreidt door tijdelijk ingehuurde krachten, zoals een Technical Inspection Service oftewel een of andere ingenieurs- of keuringsinstelling.

Kortom, er zijn gronden om nog eens een lans te breken voor praktische technische kennis van de ingenieur, de *vernunfteling* (Stevin, 1548 Brugge – 1620 Leiden / Den Haag). De kernvraag is dan niet eens zozeer welke oplossing bedacht en ontworpen kan worden, maar een optimalisering: de vraag hoe goed een bedachte oplossing is. Dit betekent dan niet het uitvoeren van uitgebreide rekenpartijen, maar via relatief eenvoudige modellen en vuistregels een voorstel taxeren. Het is dus het beantwoorden van de vraag naar het nut, die achter de vraag naar de techniek ligt. En inderdaad dit raakt het gebied van het management, maar wel vanuit technische kennis. In dit artikel worden enige aanwijzingen gegeven voor zulke technische middelen.

Het probleem

In de praktijk komt het ook vaak voor dat we willen voorspellen of een te maken constructie kan voldoen. De meest voorkomende wegen zijn dan ervaringen of berekeningen maken. De eerste wordt vaak gezien als een praktischer aanpak dan de tweede. Ervaring kan zowel betrekking hebben op ervaring uit het verleden als het opdoen van nieuwe ervaring, zoals de aanleg van een proefvak. De toepassing van ervaring kan dus onderscheiden worden naar standaard constructies en bijzondere constructies. Een soortgelijke indeling kan opgezet worden voor berekeningen, waarmee de volgende indeling ontstaat.

pro- bleem oplos- sing	standaard	bijzonder
ervaring	voorbeeld- constructies	prototype (proefvak)
rekenen (theorie)	programmatuur - vuistregels (invuloefening)	

Figuur 1: schema van soorten probleemoplossing

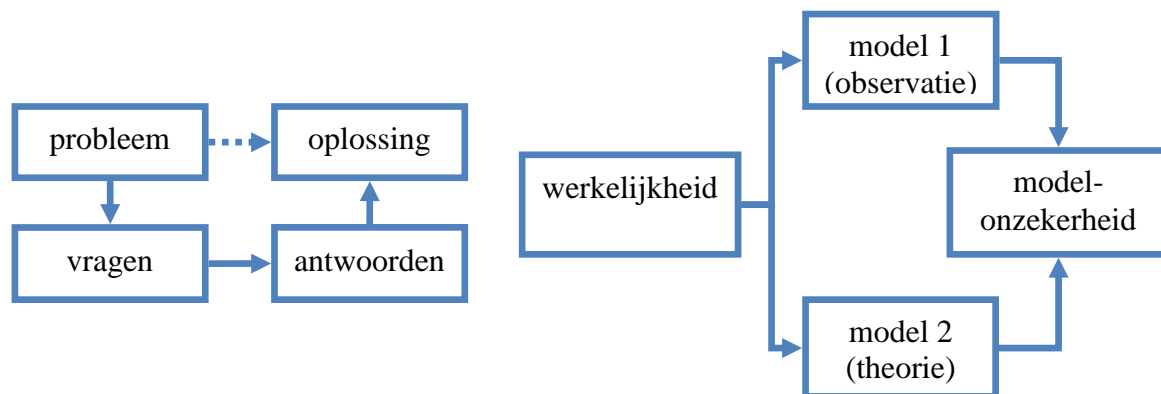
Dit schema geeft aanleiding tot twee vragen:

- hoe zien rekenmethoden voor bijzondere problemen er uit?
- hoe goed zijn de vier soorten aanpak voor de bouwpraktijk?

Als er eisen aan een product, bijvoorbeeld een verhardingsconstructie, gesteld zijn, is het zinvol dat gecontroleerd kan worden of aan deze eisen is voldaan. In het geval van materiële producten wordt dit vaak gedaan door het verrichten van metingen of inspectie. In sommige gevallen is dat echter niet mogelijk. Daarvoor zijn verschillende oorzaken denkbaar, zoals:

- het product is te klein, te groot, te complex of iets anders om te meten of te inspecteren
- het product bestaat uit vele deelproducten, zodat met een steekproef moet worden volstaan
- de meting beschadigt het product, zodat daarna het product niet meer voldoet
- het gaat om een eigenschap die nu nog niet meetbaar is, maar pas in de toekomst (levensduur)

In deze gevallen moeten we een beroep doen op ervaring of op rekenen. We maken zodoende een model van de werkelijkheid en doen via deze omweg en extrapolierend voorspellende uitspraken over zaken. Hierdoor kunnen we producten toch beoordelen, ondanks dat we er niet aan meten of inspecteren. De vraag is dan wel hoe goed deze uitspraak is.



Figuur 2: model

De vraag hoe goed een ontwerpmethodede is, kan uiteengezet worden in

- de eisen die aan het product, i.c. de verhardingsconstructie, zijn gesteld
- hoe goed de mechanismen achter deze eisen in de ontwerpmethodede zijn verwerkt m.b.t.
 - eisen die direct na productie waarneembaar zijn
 - eisen die in de loop der tijd waarneembaar worden

Het antwoord op deze vragen voor standaardproblemen is meestal op basis van een combinatie van ervaring, inzicht en relatief grote veiligheidsmarge. Enkele bezwaren tegen deze aanpak zijn de beperkte toepasbaarheid en deels te grote veiligheidsmarges, oftewel te duur. Voor bijzondere problemen moet in de eerste plaats worden nagelopen of alle eisen behandeld zijn.

Bij standaard constructies volstaan standaard berekeningen, maar bij bijzondere gevallen moet een ontwerp doordacht worden. Bij traditionele contracten is dit een aangelegenheid van de opdrachtgever, die veelal niet onder de ogen van de aannemer of het publiek komt. De aannemer heeft in de regel alleen met het bestek te maken. Bij Design-Construct contracten wordt het maken van een ontwerp de taak van de aannemer en het expliciet stellen van eisen aan een ontwerp en de constructie de taak van de opdrachtgever. Als eisen gesteld worden, zullen ze ook gecontroleerd moeten kunnen worden.

Het ontwerp van wegconstructies kan grofweg in 4 soorten worden ingedeeld:

- ervaring met standaardwerkwijzen en -constructies
- standaardberekeningen: soort rechtvaardiging
- trial and error (proefvakken)
- specialistische berekeningen (deze zijn meestal niet unaniem geaccepteerd en niet eenvoudig narekenbaar)

Rekenmethoden zijn meestal beschikbaar in de vorm van handboeken, standaardsoftware en geavanceerde software. Een belangrijk ingenieursinstrument is de vuistregel. Belangrijk is wel dat zij niet volledig empirisch is, maar tenminste gerelateerd is aan een theorie. Anders ontstaan licht gevaren van onterechte toepassing. Bovendien moeten de geldigheidsgrenzen bekend zijn.

Eisen aan berekeningen

In het vervolg wordt uitgegaan van mechanicaproblemen, i.h.b. lagenconstructies. Het algemeen mechanisch model bestaat uit 3 soorten vergelijkingen:

- ruimte (geometrie), tijd (quasi-statisch)
- behoud van energie – impuls (Newton) – statica (evenwicht)
- constitutie (materiaal)

In het algemeen wordt aangenomen dat de modellen quasi-statisch zijn, d.w.z. tijd wordt als een factor verdisconteerd. Verder zijn constructies in evenwicht. Materiaalmodellen zijn praktisch empirische modellen, in de regel vereenvoudigd tot lineaire of quasi-lineaire modellen.

Enige voorwaarden voor berekeningen, waar nog al eens de hand mee wordt gelicht, zijn:

- onderkennen van het juiste mechanisme
- geen extrapolatie en interpolatie met zorg
- geen onnodig moeilijke berekeningen (vaak alleen omdat software beschikbaar is)
- schijnnaauwkeurigheid
- relevante en juiste data
- controleberekeningen, bijv. door gebruik van een ander model, limietgevallen berekenen, mesh-wijdte variëren (FEM)
- berekeningen op getransformeerde schaal uitvoeren en onjuist terugtransformeren (levensduur is vaak op log-schaal, dus evenzo de nauwkeurigheid)
- vuistregels als fysische modellen gebruiken
- gebruik en definitie van partiële factoren; geen inzicht in werkelijke veiligheid

Liggerbenadering van een ondersteunde plaat

Probleemstelling

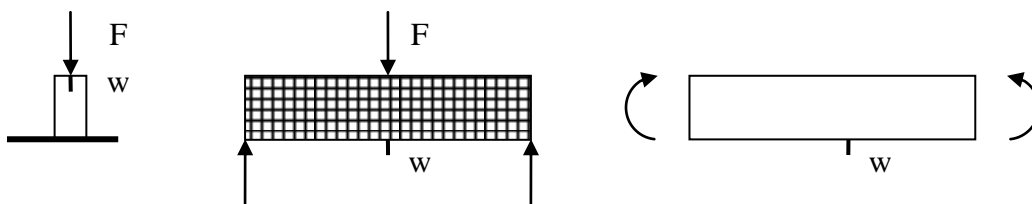
Het eerste probleem is het algemene geval van een plaat op een half-oneindig lineair elastisch medium (asfalt) en een elastisch (verend) ondersteunde plaat (beton). Het tweede model is eenvoudiger dan het eerste en kan in de regel goed dienen als vervanging. Toch is ook dit model voor een handberekening nog vrij lastig, zij het dat voor specifieke punten de Westergaard formules eenvoudig oplossingen bieden. Er is een verdere vereenvoudiging mogelijk door de plaat op te delen in een systeem (samenstel, stelsel) van liggers. Bijvoorbeeld twee verzamelingen van even grote en stijve parallelle liggers die elkaar loodrecht kruisen. Door nu buiging, torsie, afschuiving en dwarscontractie in rekening te

brengen kunnen de liggers losgekoppeld worden. In praktische gevallen neemt een buigligger in 1 richting ca. 0,25 van de belasting op. Dit nu is een vrij simpele verend ondersteunde ligger, die nog verder kan worden vereenvoudigd als een buigligger op 2 steunpunten als daarvoor de elastische lengte met de juiste factoren voor momenten en doorbuiging volgens de theorie van Hetenyi wordt de verdisconteerd.

Ook kan uit de theorie van Westergaard worden afgeleid dat randspanningen ongeveer 2 maal hoger zijn dan de spanningen in het plaatmidden. Hiermee zijn vuistregels voor het praktisch gebruik verkregen, die gebruikt kunnen worden om de juistheid van complexere berekeningen te taxeren.

Buigligger

We laten het principe van het vervangen van een model door een eenvoudiger model zien aan de hand van een voorbeeld van een buigligger op twee steunpunten met een puntlast, een schematisch geval dat uit de mechanica goed bekend is.



Figuur 3:

In de figuur zijn drie situaties getekend. Het eerste geval geeft een meting weer van de opgelegde kracht F en de verplaatsing w , waartussen we het verband willen bepalen. Dit is een veermodel, dat kan worden beschreven met de veercompliantie c als

$$w = cF$$

Het tweede geval is een rekenmodel, bijvoorbeeld een eindige elementenmodel gebaseerd op de vergelijking van lineair elastische constructies.

$$\nabla^2 \nabla^2 w = 0$$

Hierbij horen dan de geschikte randvoorwaarden. Er zijn andere theoretische modellen voor dit probleem denkbaar, maar die zijn hier niet relevant. Het eerste geval is simpel, maar vereist meting van F en w en geldt slechts voor deze ene constructie. Bovendien moet de meting kunnen worden verricht. Het tweede geval, de berekening, is universeel, binnen de beperkingen van de schematisering, maar er moeten aannamen worden gedaan, de berekening is vrij ondoorzichtig en het antwoord niet controleerbaar. Kortom, een uitkomst wordt altijd gevonden, maar de vraag is hoe goed deze uitkomst is.

In het geval dat zowel een meting als een berekening worden uitgevoerd, kunnen beide worden vergeleken. Maar dan was een berekening overbodig om de kwaliteit van het product vast te stellen en diende enkel om de meting en de berekening te vergelijken. Als één van beide, de meting of de berekening, als norm was gesteld, dan zou een uitspraak over de kwaliteit van de ander kunnen worden gedaan voor dit ene geval. Het probleem dat bij die uitspraak hoort, is niet de kwaliteit van het product, maar de kwaliteit van de meting of de berekening.

Hoe kan nu de kwaliteit van een berekening worden vastgesteld als er geen norm, geen meting of inspectie, verricht kan worden? Hiervoor bezien we een derde geval, een zuivere buigligger met moment $M = 0,25 Fl$. Het mechanicamodel hiervan is

$$\nabla^4 w = 0$$

Hiervoor bestaat in het geval van zuivere buiging een vrij simpele oplossing

$$w = \alpha \frac{Fl}{EI}$$

met $I = \frac{1}{12}bh^3$ voor een rechthoekige balkdoorsnede en $\alpha = \frac{1}{48}$. Deze oplossing kan onder bepaalde aannamen worden afgeleid uit het derde geval en anderzijds worden gerelateerd aan de metingen door

$$c = \alpha \frac{l}{EI}$$

Overlaging

Probleemstelling

Overlagingen komen in vele vormen voor, zoals vast en losliggende asfaltlagen, beton en zandcementoverlagingen, asfalt op stalen bruggen, gelijkde (natuursteen)tegels.



Figuur 4: slipstrook met tegels voor ABS testen

Rekenmodellen voor dit soort constructies zijn complexer dan die voor asfalt- en betonverhardingen op een fundering, vooral in het geval de onderliggende staaf stijver is dan de overlaag (harde tegel op beton, zachtere asfaltlaag op beton). De schadeverschijnselen (losliggen, scheurdoorgroei en de zin van wapening en SAMI etc.) zijn vaak anders dan van de conventionele modellen (vooral vermoeiing). Voor een globale schatting en voor controle van geavanceerde berekeningen zijn er gelukkig ook hier vrij eenvoudige modellen te bedenken.

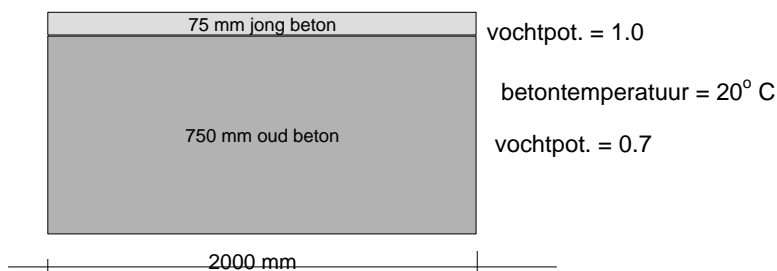


Figuur 5 scheuren in betonplaten A73

Elementenberekening

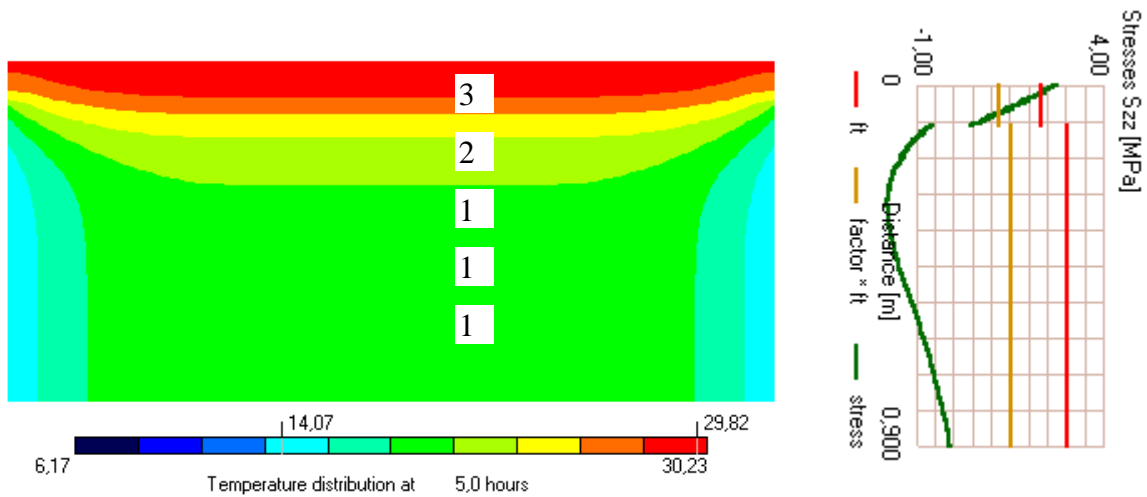
Hieronder volgt een manier om een elementenberekening met eenvoudige formules op basis van een theorie te controleren. Het probleem is in onderstaande figuur gegeven.

zonne-instraling = sinus tussen 0 en max. 468 W/m^2
 omgevingstemperatuur = $7.8^\circ \pm 4.2^\circ\text{C}$
 relatieve vochtigheid = 78%
 windsnelheid = $4,7 \text{ m/s}$
 warmtetransportcoëfficiënt = $25 \text{ W/m}^2\text{K}$



figuur 6: Opbouw basisconstructie parameterstudie

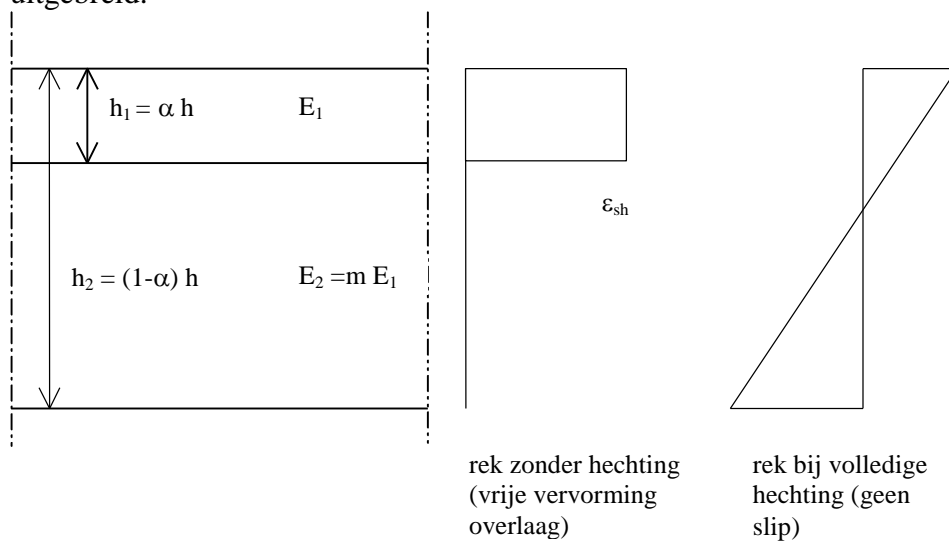
De doorsnede is voor een periode van 4 weken (672 uur) doorgerekend. De resultaten laten zien dat het dek warm wordt en daarna weer afkoelt, dat het dek krimpt en dat spanningen in de dunne overlaag ontstaan. De ontstane trekspanningen overschrijden de aangehouden limiet voor de treksterkte en hierdoor kan scheurvorming ontstaan.



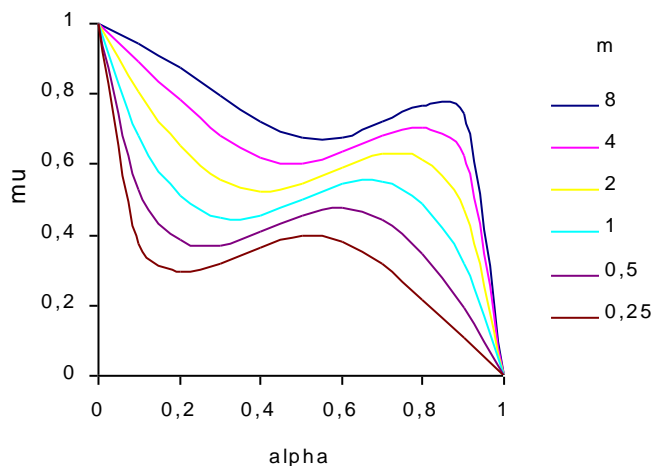
figuur 7: Temperatuurverdeling bij maximale temperatuur in het dek en line-cut over de hoogte constructie maximale spanning in overlaging.

Buigligger

De constructie kan geschematiseerd worden tot een dunne overlaag en een onderlaag die zonder slip hechten en zuivere buiging ondergaan. De aannamen zijn lineair elastisch materiaalgedrag, dwarscontractie is nul, vlakke doorsneden blijven vlak (hypothese van Bernoulli), volledige hechting tussen de lagen en vereenvoudigde rekgradiënt (zie figuur). Het model kan eenvoudig in een spreadsheet berekening tot een meerlagen systeem worden uitgebreid.



figuur 8: Definitieschets



figuur 9: Spanningsopbouw aan de onderzijde van de overlaag door verhindering van vervorming in een buiglijger (m-waarden horend bij de curven nemen af van boven naar beneden volgens de legenda)

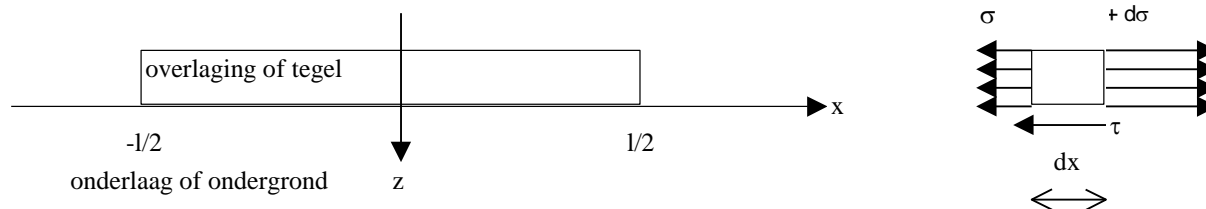
De spanning ten gevolge van de verhinderde vervorming is gedefinieerd door $\sigma = \mu E \varepsilon_{sh}$. De trekspanningen in de overlaag zijn klein als de rekken klein zijn, de overlaag uit slap materiaal bestaat of de vervorming vrij kan plaatsvinden. Dat laatste is het geval als de onderlaag relatief slap is, dat wil zeggen $\alpha \rightarrow 1$ of $m \rightarrow 0$. Ook zal dat het geval zijn als de hechting tussen beide lagen gering is. Dit aspect maakt geen onderdeel van het model uit, omdat daar uitgegaan is van volledige hechting.

De buigpunten in de curven suggereren dat twee mechanismen voorkomen. Dit zijn de eigen stijfheden van de lagen en de verschuiving van de neutrale lijn. Hoewel het materiaalgedrag lineair is treedt geometrisch niet-lineair gedrag op.

Afschuiflijger

In het bovenstaande model komt de plaatlengte niet voor en is uitgegaan van volledige hechting. Een model waarin deze aspecten wel voorkomen bevat een relatie tussen de schuifspanning tussen beide lagen en de slip. Stel dat een plaat van beperkte afmetingen verkort zonder te buigen. Voor de plaat (bovenlaag) geldt dan $hd\sigma - \tau dx = 0$, $\sigma = E\varepsilon$,

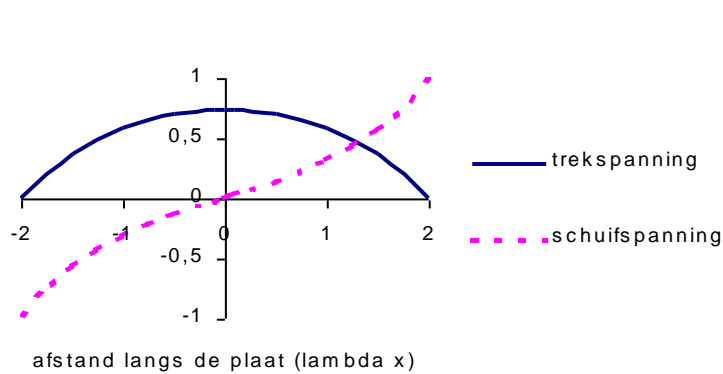
$$\tau = ku, \quad \sigma = \frac{\partial u}{\partial x}$$



figuur 10: Definitieschets

h dikte overlaging, τ schuifspanning tussen beide lagen, σ trekspanning in de bovenlaag, ε opgelegde rek in de bovenlaag en u verplaatsing in de bovenlaag

Dit leidt tot de volgende differentiaalvergelijking, waaruit voor een eindige plaat als oplossingen voor σ en τ volgen



$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \lambda \sigma = \lambda \varepsilon_0$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{hE}}$$

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh\left(\frac{\lambda l}{2}\right)} \right)$$

$$\tau = E\lambda h \left(\frac{\sinh(\lambda x)}{\cosh\left(\frac{\lambda l}{2}\right)} \right)$$

figuur 11: Schematisch verloop van de trek- en schuifspanningen

Voor lange platen worden de maximale waarden bereikt $\sigma = E\varepsilon$ en $\tau = E\varepsilon\lambda h$

Het uitgangspunt bij deze afleiding is dat de bovenplaat blijft aansluiten aan de ondergrond. Het resultaat geeft de invloed van de plaatlengte en het verloop van de spanningen langs de plaat weer. De maximale plaatlengte wordt bereikt bij de natuurlijke scheurafstand, dat wil zeggen de plaatlengte waarbij de spanning de sterkte overschrijdt.

Scheurvorming

In het bovenstaande is er van uit gegaan dat de onderlaag als een continue laag fungeert. Dat kan te optimistisch zijn. Bekend is het geval van scheurdoorslag in overlaging bij starre (cement)gebonden funderingen en bij voegen van betonplaten. Het is dus belangrijk na te gaan of dit mechanische ondergeschikt is en zo nee daarvoor een toepasbaar model te kiezen. De bovenbeschreven berekeningswijzen zijn dan onzin.



Figuur 12: reflectie van voegen in de overlaging

Stellingen

1. Eenvoudige rekenmiddelen zijn wenselijk voor
 - het opzetten van complexere berekeningen
 - de controle van uitkomsten
 - het bepalen van de randvoorwaarden voor de geldigheid van berekeningen

2. Vuistregels, dimensieanalyses en ervaring moeten niet afgedankt worden, omdat softwarematige middelen voorhanden zijn
3. Standaardconstructies worden soms geëxtrapoleerd; de voorwaarden voor gebruik moeten van geval tot geval kritisch worden beschouwd
4. Kennis van de mechanica en fysica zijn onontbeerlijk voor een ingenieur, hoewel de indruk ontstaat dat men hier in de huidige wegenbouw soms tekort schiet
5. Een probleem van geheel andere aard is hoe goed een ontwerpmethode, in tegenstelling tot een ontwerp op een enkel aspect, is. Dit speelt bij ontwerpen die niet in een standaardmethode zijn vervat
6. Algemeen geaccepteerde ontwerpmethoden kunnen het gevolg van niet-technische compromissen zijn. Hun technische waarde is dan bedenkelijk.

Referenties

1. Fedde Tolman, Leo J. M. Dohmen, Bianca E.J. Baetens; CROW Infradagen 2000
2. Dennis van der Ven, Fedde Tolman Asfaltverlaging op stijve verhardingslagen; CROW Infradagen 2004
3. Patrick van der Meer; Harrie van den Top; ; Fedde Tolman; Frank Bijleveld; Overlaging betonverhardingen met dunne asfaltlagen aanbesteed als DC contract; CROW Infradagen 2006
4. Fedde Tolman, Jan Sybren Boersma; Testen van voertuigen met behulp van wegverhardingen); CROW Infradagen 2012