

e0601223-3

Rapportage
opstellen modellen temperatuurcorrectie
ingegoten basaltbekledingen te Zeeland

Projectnummer : e0601223-3
Offertenummer en datum : 0601223 d.d. 21 juni 2006
Titel rapport : Rapportage onderzoek asfaltmastiek basaltbekleding
Status rapport : Concept

Naam opdrachtgever : Rijkswaterstaat Zeeland
Adres : postbus 1000
Plaats : Middelburg
Naam contactpersoon : De heer ing. Y.M. Provoost
Datum opdracht : 19 juli 2006
Kenmerk opdracht : ZLDO35060588

Contactpersoon KOAC•NPC : ing. A.K. de Looff
Auteur(s) rapport : ir. F. Tolman
ir. D. van der Ven

Rapportage

Naam: ir. D. van der Ven

Handtekening:



Datum: 7 november 2006

Autorisatie

Naam: ing. A.K. de Looff

Handtekening:



Datum: 7 november 2006

Zonder schriftelijke toestemming van KOAC•NPC mag het rapport (of certificaat) niet anders dan in zijn geheel worden gereproduceerd.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Berekening laagstijfheden ingegoten basaltbekleding	5
2.1	Gehanteerde methode voor berekeningen stijfheden bij voorgaande projecten.....	5
2.2	Berekening laagstijfheden volgens nieuwe methode	6
3	Temperatuurinvloeden op de mastiek.....	8
3.1	Invloed van het percentage aggregaat.....	8
3.2	Invloed van de gradering van het aggregaat in de mastiek.....	9
4	Model voor temperatuurcorrectie ingegoten basalt.....	12
4.1	Theoretisch model van de samengestelde buiglijger	12
4.2	Praktisch model voor temperatuurcorrectie ingegoten basaltbekleding.....	16
5	Invloed van de plaatdiameter op de berekende stijfheid.....	20

Bijlagen

1 Inleiding

Voor het project “verbetering methodiek van VGD-metingen op ingegoten basaltzuilen” zijn valgewichtmetingen uitgevoerd voor de bepaling van de laagstijfheden van de ingegoten basaltbekleding en is onderzoek uitgevoerd naar de eigenschappen van de gebruikte asfaltmestiek. Aan de hand van de resultaten van deze onderzoeken is een model opgesteld voor de temperatuurcorrectie van de ingegoten basaltbekleding. In deze rapportage is de totstandkoming van het model verantwoord.

In hoofdstuk twee volgt een uiteenzetting van de uitgangspunten die gehanteerd zijn voor de berekening van de laagstijfheden van de ingegoten basaltbekleding. In hoofdstuk drie wordt het model voor de tijd- en temperatuurafhankelijkheid voor de asfaltmestiek uitgewerkt. In hoofdstuk vier vindt de uiteenzetting van het model voor de temperatuurcorrectie op de stijfheden van de ingegoten basaltbekleding plaats. Als laatste is in hoofdstuk vijf de invloed van de plaatdiameter op de berekende stijfheid nagegaan.

2 Berekening laagstijfheden ingegoten basaltbekleding

Nu voor meerdere bekledingen de laagstijfheid van de ingegoten basaltlaag is berekend wordt een steeds beter inzicht gekregen in de bijzonderheden die meespelen bij een ingegoten basaltbekleding. De methode voor de berekening van de laagstijfheden is dan ook nog steeds in ontwikkeling. Met het opstellen van een model voor de temperatuurcorrectie en de hiermee samengaande analyse van de uitgevoerde metingen wordt een steeds beter inzicht gekregen in welke factoren een invloed hebben op berekende laagstijfheden. Met deze nieuwe inzichten is de methode voor de berekening van de laagstijfheden van de ingegoten basaltbekleding nog enigszins aangepast. Hieronder staan de belangrijkste veranderingen weergegeven.

2.1 Gehanteerde methode voor berekeningen stijfheden bij voorgaande projecten

Tot nu werd voor de terugrekening van de laagstijfheden van ingegoten basaltbekleding, filterlaag en ondergrond de volgende methode aangehouden:

1. data analyse van de VGD-metingen en verwijderen van de foutmetingen;
2. bepalen van het percentage bruikbare metingen;
3. terugrekenen van de individuele laagstijfheden per locatie;
4. bepalen van het percentage metingen met centrumdeflecties;
5. bepalen van de gemiddeld gemeten stijfheid (per raai) van alle punten.

Hierbij zijn de volgende opmerkingen te maken:

Punt 3: terugrekenen van laagstijfheden

Voor de berekening van de laagstijfheid werden tot nu toe geen beperkingen opgelegd aan de grootte van de stijfheden van de ondergrond (dijklichaam) en de filterlaag. Hierdoor was het mogelijk dat de zeer hoge laagstijfheden teruggerekend werden voor de ingegoten basaltbekleding in combinatie met een zeer lage stijfheid voor de filterlaag. Tevens was het mogelijk om zeer lage stijfheden voor de ingegoten basalt terug te rekenen in combinatie met een zeer hoge stijfheid voor de filterlaag. Ook al wordt het filtermateriaal los gestort en is het materiaal wellicht afkomstig uit verschillende partijen, toch zullen de laagstijfheden die teruggerekend worden binnen een bepaalde bandbreedte (moeten) liggen. De locaties met zeer lage of hoge tussenlaagstijfheden zorgen voor uitschieters qua stijfheden van de ingegoten basaltbekleding die op hun beurt weer (een grote) invloed hebben op de berekende gemiddelde stijfheid van de ingegoten bekleding.

De voorkeur gaat er dan ook naar uit om de punten waar zeer hoge of lage stijfheden voor de tussenlaag worden gevonden opnieuw te berekenen met een beperkte bandbreedte voor de stijfheid van de tussenlaag. Veelal wordt hiermee het deflectieprofiel gelijkwaardig benadert maar zijn de uitkomsten voor de berekende stijfheden voor de ingegoten basaltbekleding aannemelijker. Voor de laagstijfheid van de ingegoten basaltbekleding op locaties met centrumdeflectie blijkt de invloed van de limitering van de stijfheid van de tussenlaag klein. Bij deze locaties worden nog steeds zeer lage stijfheden gevonden voor de ingegoten basaltbekleding wat goed overeen komt met het gemeten deflectieprofiel.

Punt 4: centrumdeflecties

Wat betreft het bepalen van het percentage metingen met centrumdeflectie hoeft niets te veranderen. De hoeveelheid van deze punten geeft een indicatie van hoe goed/slecht een bekleding is ingegoten. Wellicht dat sommige bekledingen beter in te gieten zijn dan anderen afhankelijk van hoe ze gezet zijn, of ze ingewassen zijn of niet en wanneer en hoe goed dit gebeurd is. Wanneer aangenomen wordt dat deze centrumdeflectie ontstaan op locaties die niet goed zijn ingegoten (om wat voor reden dan ook) dienen deze stijfheden niet gecorrigeerd te worden voor temperatuur (geen mastiek → geen temperatuurcorrectie).

De bekleding gedraagt zich hier niet als buiglijger. Er is hier geen trek mogelijk aan de "onderkant" van de bekleding doordat er geen mastiek aanwezig is. De teruggerekende stijfheden zijn dus fictieve buigstijfheden die het gemiddelde onterecht omlaag halen. Het percentage punten met centrumdeflectie geeft wel een goede indicatie van het aantal "slechte plekken" in de ingegoten basaltbekleding.

Punt 5: berekening van de gemiddelde laagstijfheden

Op de bekleding van de oude veerhaven te Kruiningen zijn herhalingsmetingen uitgevoerd (bij verschillende temperaturen). Bij deze metingen is gekeken of bij verschillende temperaturen dezelfde locaties centrumdeflectie vertonen en of de berekende stijfheden per meetlocatie een zelfde trend vertonen (verwacht wordt dat indien een meetpunt een hogere stijfheid heeft dan het gemiddelde bij 20°C dit ook bij 5°C zo zal zijn). Zowel de centrumdeflecties als de berekende stijfheden blijken bij verschillende temperaturen niet met elkaar overeen te komen. Dit is waarschijnlijk het gevolg dat het onmogelijk is om meerdere keren op exact dezelfde locatie te meten (op de centimeter(s)). De basaltzuilen zijn dusdanig klein dat het qua metring lijkt of je op exact dezelfde locatie staat maar (deels) wel op een andere zuil en over andere voegen staat (zowel in lengterichting als in dwarsrichting op de dijk). De invloed van een kleinere verandering qua locatie blijkt dusdanig groot dat het niet zinvol is individuele laagstijfheden per locatie met elkaar te gaan vergelijken tegen de temperatuur maar beter gekeken kan worden naar de gemiddelde laagstijfheid tegen de temperatuur.

2.2 Berekening laagstijfheden volgens nieuwe methode

Na een nadere analyse van de beschikbare data is de volgende methode voor de berekening en beoordeling van de laagstijfheden opgesteld:

1. data analyse van de VGD-metingen en verwijderen van de foutmetingen;
2. bepalen van het percentage bruikbare metingen;
3. terugrekenen van de individuele laagstijfheden per locatie;
 - a. bij stijfheden van kleiner dan 50 MPa voor de filterlaag worden de berekeningen opnieuw gemaakt met de volgende uitgangspunten:
 - i. stijfheid ingegoten basaltlaag is zonder beperkingen;
 - ii. stijfheid van de filterlaag ligt tussen de 100 en 250 MPa;
 - iii. stijfheid van de ondergrond ligt tussen de 10 en 100 MPa.
4. opsplitsen van de stijfheden per locatie naar:
 - a. locaties waar de bekleding reageert als een buiglijger ($E_1 > E_2$)
 - b. locaties waar de bekleding centrumdeflectie vertoont ($E_1 < E_2$)
5. bepalen van het percentage metingen met centrumdeflecties;

6. bepalen van de gemiddeld gemeten stijfheid van alleen de punten waar de bekleding reageert als buiglijger ($E_1 > E_2$).

Hiermee zijn de twee parameters bepaald die inzicht geven in de kwaliteit van de ingieting en daarmee de kwaliteit en sterkte van de bekleding. Ten eerste geeft het percentage locaties met centrumdeflectie aan hoeveel de bekleding zich niet gedraagt als buiglijger. Kortom op deze locatie werkt de mastiek niet samen met de basaltzuilen en heeft dus lokaal geen versterking van de bekleding plaatsgevonden door ingieting. Ten tweede wordt de gemiddelde stijfheid van de bekleding bepaald voor alle locaties waar de bekleding zich wel gedraagt als buiglijger. Hier werkt de mastiek samen met de basaltzuilen en levert dus een versterking ten opzichte van een niet ingegoten bekleding. De gemiddeld teruggerekende stijfheid van deze locaties zal afhankelijk zijn van de hoogte van de basaltzuilen, de diepte van de ingieting en de hechting tussen de mastiek en de zuil. Een hogere stijfheid zal dus samen gaan met een goede (diepe) ingieting en goede hechting tussen mastiek en basaltzuil.

Op deze locaties (gedrag als buiglijger) zal de laagstijfheid van de bekleding als geheel (basaltzuilen en mastiek) afhankelijk zijn van de temperatuur. Des te hoger de temperatuur des te lager de teruggerekende stijfheid (bij zelfde ingieting en effectiviteit van de hechting basalt en mastiek). Deze locaties komen dus in aanmerking voor een correctie van de stijfheid naar temperatuur waarmee metingen bij verschillende temperaturen met elkaar vergeleken kunnen worden.

3 Temperatuurinvloeden op de mastiek

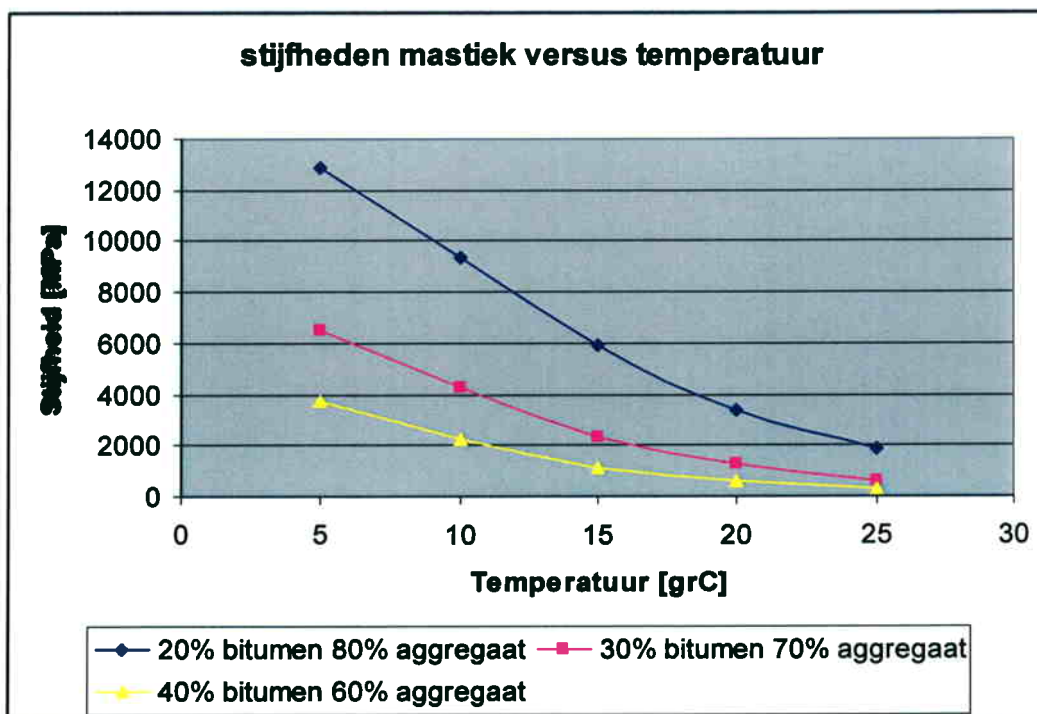
In de rapportage "onderzoek asfaltmastiek ingegoten bekledingen te Zeeland" (KOAC-NPC rapport 0601223-2) zijn reeds inschattingen gemaakt voor de stijfheden van de mastiek van de verschillende ingegoten bekledingen. Dit is gedaan aan de hand van de stijfheid van de bitumen en samenstelling van de mastiek (volume percentage aggregaat en volume percentage bitumen) waarbij er vanuit gegaan is dat er in de mastiek geen holle ruimte aanwezig is. Met deze uitgangspunten zijn de stijfheid van de bitumen en de stijfheid van de mastiek bepaald aan de hand van de nomogrammen van Van der Poel en Bonnaure. De berekende stijfheden per locatie van de mastiek bij een temperatuur van 5°C zijn opgenomen in tabel 3.1.

Tabel 3.1: Berekende stijfheden van de asfaltmastiek per locatie bij 5°C

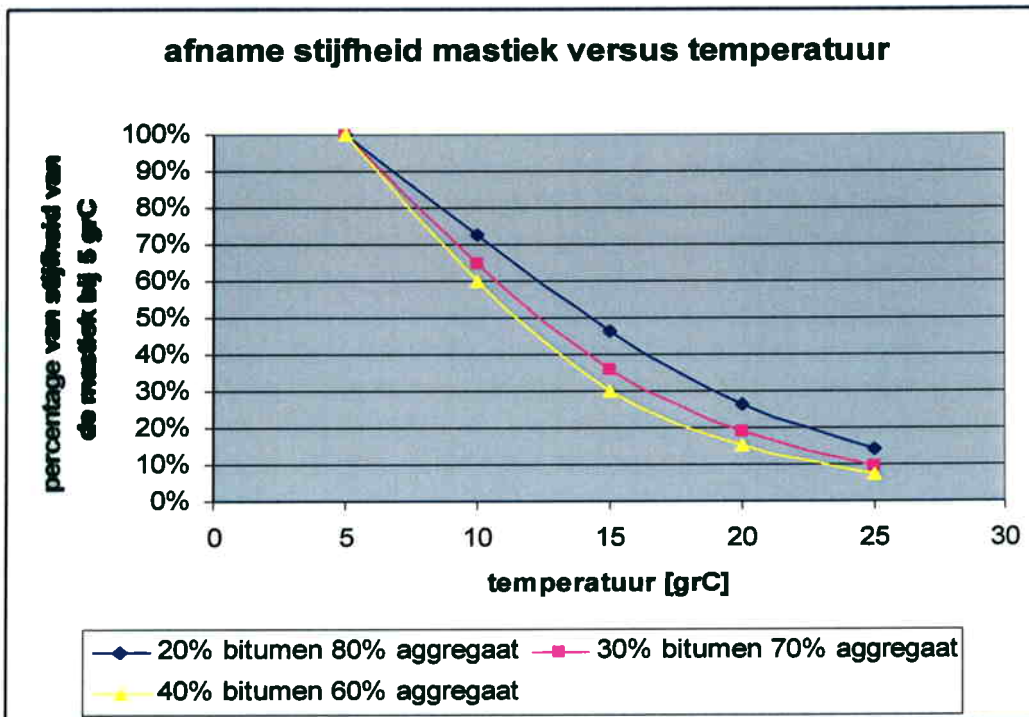
Locatie	Temperatuur [°C]	Sbit [MPa]	Bitumen [% v/v] "in"	Aggregaat [% v/v] "in"	Smastiek [MPa]
Vlissingen	5,0	272	35,6	64,4	4.080
Colijnsplaat	5,0	214	25,3	74,7	6.800
Kruiningen	5,0	333	30,6	69,4	6.510
Kattendijke	5,0	305	27,1	72,9	7.620

3.1 Invloed van het percentage aggregaat

Uit deze tabel blijkt de invloed van het percentage bitumen/aggregaat op de stijfheid van de mastiek. In figuur 3.1 is de invloed van de temperatuur te zien voor één type bitumen (locatie Kruiningen) en bij verschillende percentages [v/v] bitumen.



Figuur 3.1: mastiekstijfheid versus temperatuur



Figuur 3.2: procentuele afname van de stijfheid van de asfaltmastiek bij temperatuurstijging

Uit figuur 3.1 volgt dat de mastiek stijver wordt naarmate meer aggregaat aanwezig is in de mastiek. In figuur 3.2 is te zien dat de mastiek gevoeliger is voor temperatuurwisselingen naarmate er meer bitumen in aanwezig is. Het lijkt dus wenselijk een mastiek toe te passen met een laag bitumenpercentage omdat hierdoor hogere stijfheden voor de mastiek en daarmee de ingegoten basaltbekleding gerealiseerd worden. Aan de andere kant is het zo dat de ingieting waarschijnlijk beter (dieper) zal zijn als een lager percentage bitumen wordt gebruikt. De wens is dus om te komen tot een mastieksamenstelling met een zo hoog mogelijk percentage aggregaat maar die wel alle voegen tussen de zuilen volledig penetreert.

3.2 Invloed van de gradering van het aggregaat in de mastiek

Bij normale mengsels, waaronder de mastiek, is de gradering geen belangrijke factor. Dit blijkt o.a. uit de modellen om de mengselstijfheid uit de fracties van de componenten en de bitumeneigenschappen te berekenen. Een andere aanwijzing is de gemiddelde filmdikte bij een uniforme gradering en bolvormige korrels, die berekend kan worden als

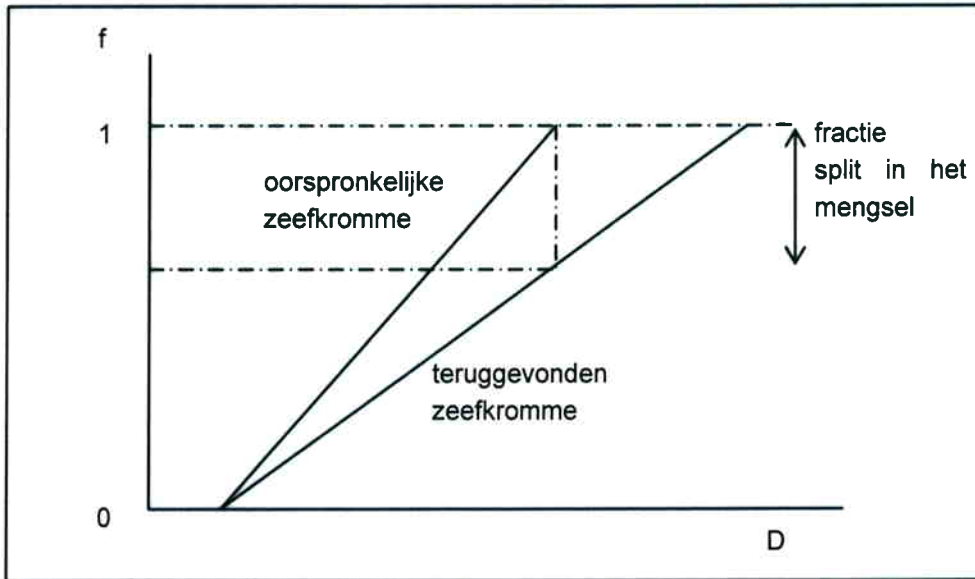
$$v_b \propto \frac{(D+t)^3 - D^3}{D^3} \Rightarrow \frac{t}{D} \propto (v_b + 1)^{1/3} - 1$$

met

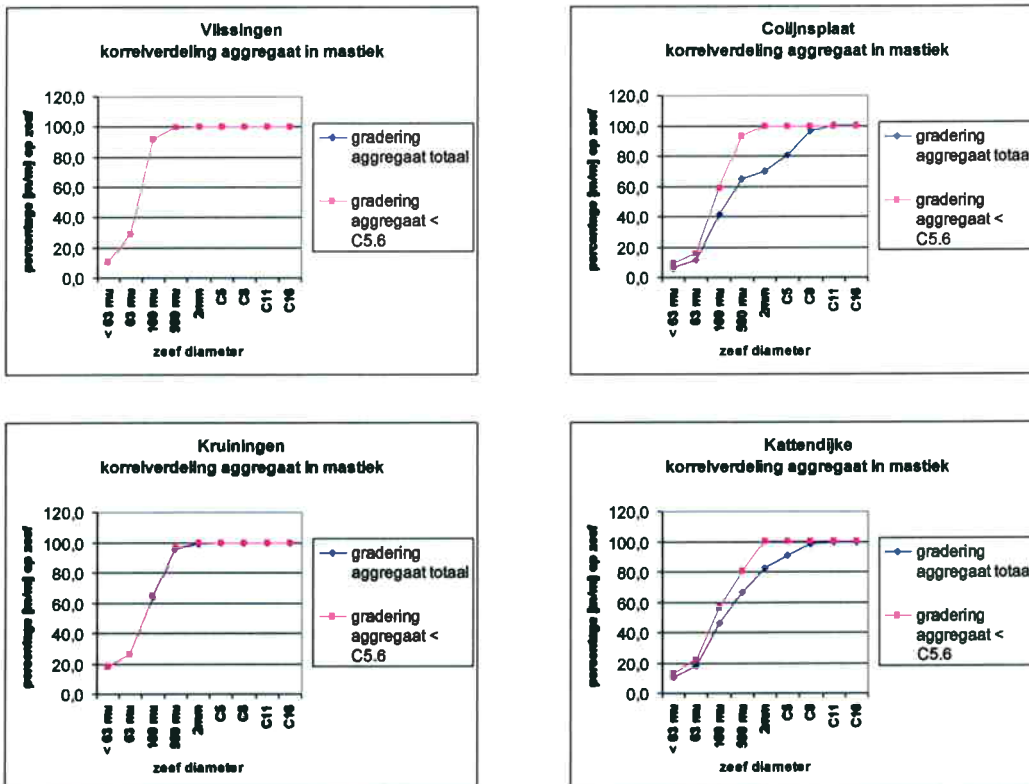
- t filmdikte
- v_b relatieve bindmiddelhoeveelheid
- D korreldiameter

Verandering van de diameter leidt dus tot een evenredige verandering van de filmdikte. Bij gebruikelijke mengsels is dit geen aanleiding tot grote verandering van de stijfheid.

Bij een aantal mengsels is de gradering aanzienlijk grover dan de verwachting is. Daarbij is ook het bitumengehalte lager. Beide feiten samen wijzen erop dat in de onderzochte monsters een hoeveelheid split, afkomstig van het inwassen, aanwezig kan zijn.



Figuur 3.3: schematische weergave van de invloed split op de zeefkromme



Figuur 3.4: gradering naar korreldiameter van de verschillende bekledingen

In de mastiek van Vlissingen en Kruiningen is geen aggregaat aanwezig dat op de C5.6 zeef achter blijft. Hier is de mastiek dus opgebouwd uit fijn materiaal en bitumen. Bij de locaties Colijnsplaat en Kattendijke is wel aggregaat aanwezig dat op de C5.6 zeef en groter (tot C16) achterblijft. Vooral de zeefkromme voor Colijnsplaat lijkt te zijn ontstaan door insluiting van ingewassen split door de mastiek. Hierdoor neemt het percentage bitumen in de mastiek af en zal de mastiek stijver worden.

In tabel 3.2 zijn de verhoudingen bitumen en aggregaat in de mastiek gegeven wanneer alleen aggregaat < C5,6 in de mastiek in beschouwing wordt genomen. Het valt op dat het percentage aggregaat in de mastiek toe neemt naarmate er materiaal met een grotere diameter aanwezig is. Dit lijkt het gevolg te zijn van het insluiten van de ingewassen split in de mastiek.

Tabel 3.2: Berekende stijfheden van de asfaltmastiek per locatie bij 5°C naar gradering

Locatie	T [°C]	Sbit [MPa]	Totaal aggregaat			aggregaat < C5,6		
			Bitumen [% v/v] "in"	Aggregaat [% v/v] "in"	Smastiek [MPa]	Bitumen [% v/v] "in"	Aggregaat [% v/v] "in"	Smastiek [MPa]
Vlissingen	5,0	272	35,6	64,4	4.080	35,6	64,4	4.080
Colijnsplaat	5,0	214	25,3	74,7	6.800	32,6	67,4	4.080
Kruiningen	5,0	333	30,6	69,4	6.510	30,8	69,2	6.430
Kattendijke	5,0	305	27,1	72,9	7.620	31,0	69,0	5.940

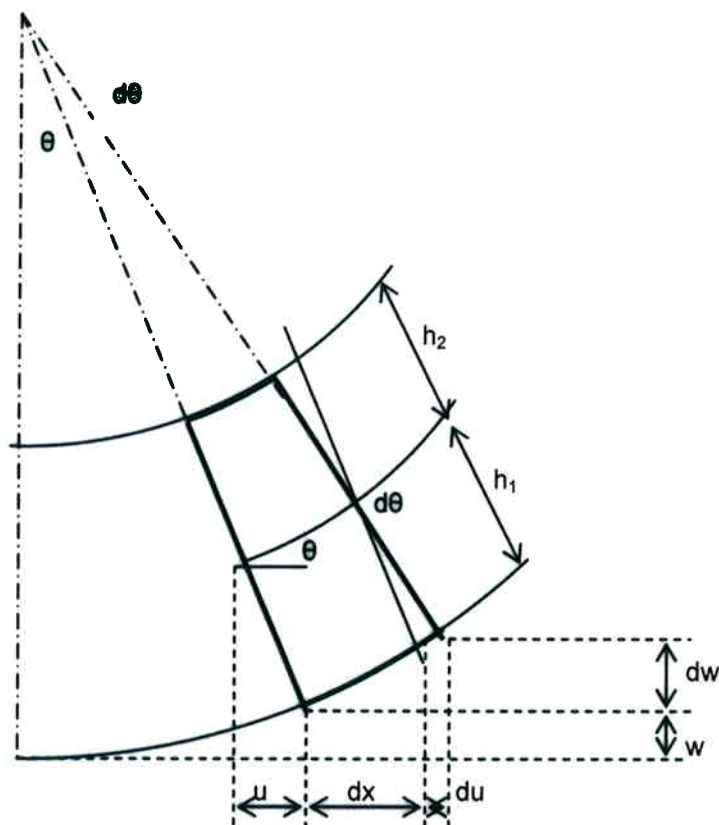
De invloed van de diameter van de stenen in de mastiek heeft dus geen invloed op de stijfheid van het mengsel. Het lijkt er in de praktijk echter wel op dat de mengsels met grover aggregaat procentueel ook meer aggregaat bevatten en daardoor stijver zijn. De stijfheid van de mengsels is voornamelijk afhankelijk van de gebruikte bitumen en de hoeveelheid bitumen in de mastiek.

4 Model voor temperatuurcorrectie ingegoten basalt

Om te komen tot een model voor de temperatuurcorrectie van de ingegoten basaltbekleding zijn op de havendam van de oude veerhaven te Kruijningen metingen uitgevoerd bij verschillende temperaturen. Voor de berekening van de stijfheden wordt de ingegoten basaltbekleding gemodelleerd als een buigligger. Om inzicht te krijgen in de invloed van de temperatuur op de stijfheden wordt hieronder eerst een theoretische uiteenzetting gegeven van de samengestelde buigligger (basaltzulen en mastiek) waarna de theorie wordt vergeleken met de resultaten uit de praktijk. Op basis van de uitgevoerde praktijkmetingen is een model voor de temperatuurcorrectie van de stijfheid opgesteld dat later nog verder geijkt zal moeten worden aan de hand van metingen op meerdere (andere) bekledingen.

4.1 Theoretisch model van de samengestelde buigligger

De stijfheden worden berekend met een meerlagenmodel. Dit model is wiskundig vrij lastig. Een goed inzicht in zo'n meerlagenmodel wordt verkregen met een liggermodel (zie figuur 4.1).



Figuur 4.1: buigliggermodel

De traditionele afleiding is voor een (niet samengestelde) buigligger:

definitie

$$\varepsilon = \frac{du}{dx}$$

$$M = \int \sigma z dz \quad (\text{ook intern evenwicht in een snede door de balk})$$

constitutie

$$\sigma = E \varepsilon$$

geometrie

$$du = z d\theta \Rightarrow \frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{z} \frac{du}{dx}$$

$$dw = -\theta dx \Rightarrow \theta = -\frac{dw}{dx}$$

evenwicht

$$dM = -D dx$$

$$dD = q dx$$

Deze afleiding verandert niet als aan het mootje een onvervormbaar mootje (basaltzuil t.o.v. de mastiek) wordt gekoppeld omdat zowel dx als dw proportioneel veranderen. De samengestelde E-modulus wordt dus een serieschakeling van mootjes met verschillende E-moduli, gelijk een balk die op axiale trek wordt belast.

$$\sigma = \sigma_i$$

$$\varepsilon dx = \sum \varepsilon_i dx_i$$

$$dx = \sum dx_i$$

$$\sigma = E\varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\frac{\sum \varepsilon_i dx_i}{\sum dx_i}} = \frac{\sigma}{\frac{\sum \frac{\sigma}{E_i} dx_i}{\sum dx_i}} = \frac{\sum dx_i}{\sum \frac{dx_i}{E_i}} = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{E_i}}$$

met

$$X_i = \frac{dx_i}{\sum dx_i}$$

De samengestelde stijfheid van de bekleding wordt dus bepaald door de stijfheid van de mastiek en de relatieve hoeveelheid mastiek (b; laagdikte).

Voorbeeld

$$E_{\text{basalt}} = 40.000 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{mastiek}} = 5.000 \text{ MPa}$$

$$b_{\text{basalt}} = 200 \text{ mm}$$

$$b_{\text{mastiek}} = 20 \text{ mm}$$

$$E = \frac{200 + 20}{\frac{200}{40.000} + \frac{20}{5.000}} = \frac{220}{9 \cdot 10^{-3}} = 24.400 \text{ MPa}$$

Als door temperatuurverhoging $E_{\text{mastiek}} = 500 \text{ MPa}$ is $E = 4.900 \text{ MPa}$. De stijfheid van de bekleding is daarmee praktisch zo'n 5 – 10 keer groter dan de stijfheid van de mastiek, mits de mastiek over de volledige hoogte is ingegoten en volledig hecht.

Voor een ligger op elastische veren (Hetenyi) kan uit bovenstaande worden afgeleid

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{k}{EI} w = \frac{q}{EI}$$

$$L = \left(4 \frac{EI}{k} \right)^{1/4}$$

$$\lambda = L^{-1}$$

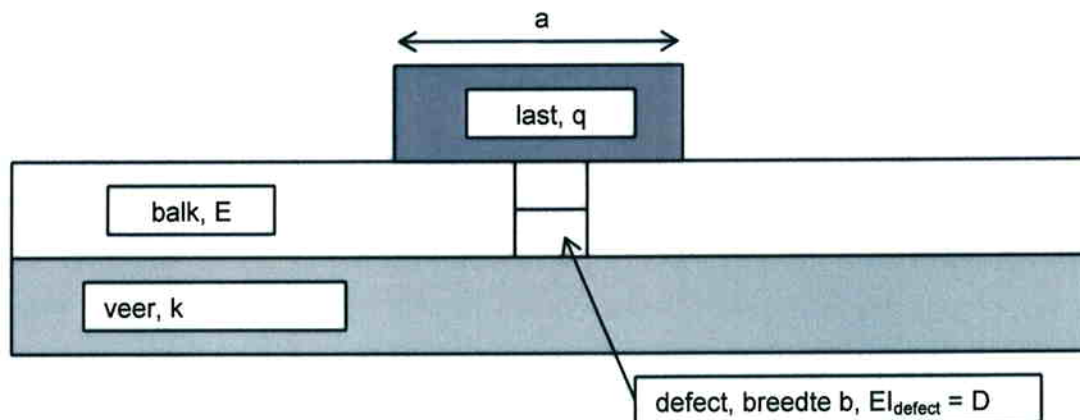
L	traagheidstraal
w	vervorming in de z-richting [m]
b	breedte van de balk [m]
$I = \frac{1}{12} bh^3$	inwendig/traagheidsmoment van de balk [m ⁴]

E	stijfheidsmodulus [Nm ⁻²]
q	belasting per lengte eenheid [Nm ⁻¹]
k ₀	ondergrond stijfheid [Nm ⁻³]
k = b k ₀	veerstijfheid [Nm ⁻²]

De orde van grootte van $L = \left(4 \frac{(100 \text{ a } 10000) \cdot \frac{1}{12} 200^3}{0,1} \right)^{1/4} = 71 \text{ a } 710 \text{ mm}$. Dit is dus de

orde van grootte van de basaltblokken en de belastingplaat (rond 300 of 450 mm).

Het model kan gebruikt worden om defecten in de ligger te schatten.



Figuur 4.2: model van een balk met één enkel defect

De Bondt p.14 geeft voor het moment in de balk t.p.v. het defect

$$M = \frac{1}{8} q \left(b^2 + L^2 \left(\frac{8 \sin\left(\frac{L}{2(a-b)}\right) \exp\left(\frac{-L}{2(a-b)}\right) + 4 \frac{b}{L} - \frac{2 EI}{3 D} \left(\frac{b}{L}\right)^3}{2 + \frac{EI b}{D L}} \right) \right)$$

Als nu beide effecten, composiet materiaal en defecten, worden beschouwd, kan uit de waarnemingen (zie figuur 4.3) worden geschat dat de defecten voorgesteld kunnen worden als een fictieve vergroting van de mastiekdikte (b) of verkleining van de (ingegoten) mastiekhogte ($l_{\text{defect}} \propto h_{\text{defect}}^3$). Deze factor is vrijwel onafhankelijk van de temperatuur.

Aangezien de mastiekdikte vrij goed rechtstreeks bepaald kan worden, ligt het voor de hand deze factor als een effectieve ingiethoogte voor te stellen.

De toepassing van deze uitdrukking voor M , die bovendien nog beperkt is tot één defect, is lastig. Daarom wordt het effect van de defecten volledig toegeschreven aan h , en dus l , en wordt b constant genomen. De eenvoudigste methode om h te schatten is:

- bereken $E_{\text{theoretisch}}$ uit het trekliggermodel voor verschillende T en E_{mestiek} uit nomogrammen van Van der Poel en Bonnaure
- bereken $h_{\text{gereduceerd}} = h (E_{\text{FWD}} / E)^{1/3}$

De verhouding van $h_{\text{gereduceerd}}/h_{\text{basaltzuil}}$ ($=h_{\text{effectief}}$) zal een goede indicatie geven over de toegevoegde waarde van de ingieting van de basaltzuilen. Naarmate de factor $h_{\text{effectief}}$ meer bij 1 komt te liggen zal de bekleding vollediger ingegoten zijn en hechten aan de basaltzuilen. Naarmate de factor $h_{\text{effectief}}$ lager is zal de bekleding minder diep ingegoten zijn of een slechtere hechting hebben tussen basaltzuil en mestiek. Deze hoogte van de ingieting, breedte van de voeg (mestiekdikte) en hechting tussen basaltzuil en mestiek zal op iedere locatie (meetpunt) weer verschillen. Aangezien de spreiding van de gevonden stijfheden sterk afhankelijk zijn van de geometrie per meetpunt (ingietingshoogte, breedte van de voeg) en hechting basaltzuil en mestiek geniet het de voorkeur om een temperatuurcorrectie op een gemiddelde stijfheid van de bekleding toe te passen. Wanneer genoeg punten op een bekleding worden gemeten mag er vanuit gegaan worden dat hierdoor een representatief beeld verkregen wordt van:

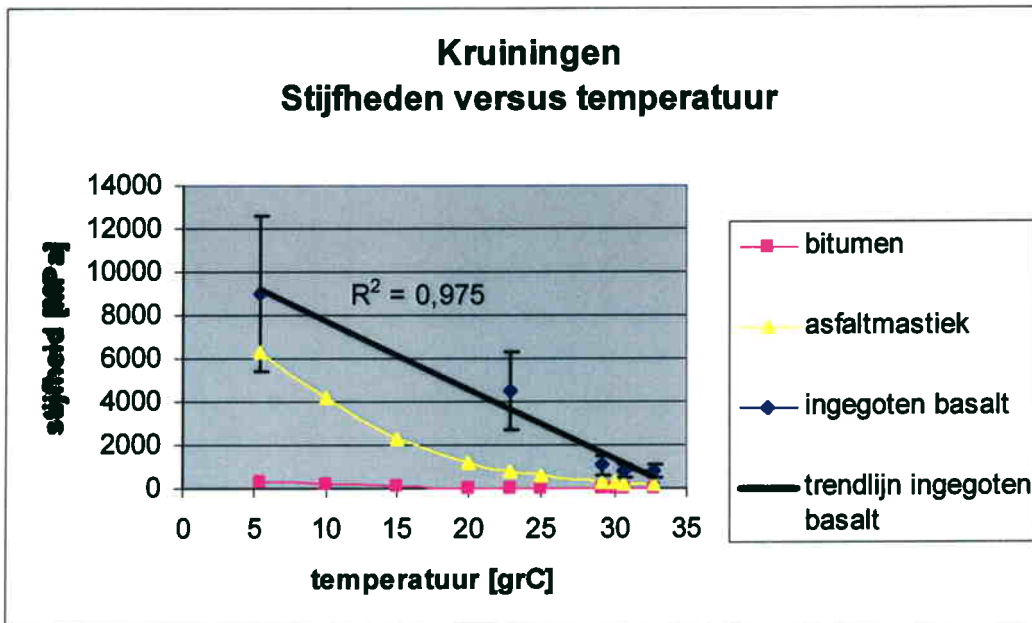
1. de gemiddelde hoogte van de ingieting met mestiek;
2. de gemiddelde breedte van de voeg (en dus de breedte van de mestiek t.o.v. de basaltzuil);
3. de gemiddelde hechting van de mestiek aan de basaltzuilen;
4. en dus de gemiddelde stijfheid van de ingegoten basaltbekleding bij één temperatuur.

Hierdoor zou bij een gemiddelde stijfheid wel de invloed van de temperatuur van de mestiek terug gevonden moeten worden aangezien de lokale verschillen door geometrie en hechting nu uitgemiddeld zijn. Het verdient dus aanbeveling om dijkbekledingen van ingegoten basalt op te delen in homogene dijkvakken en de temperatuurcorrectie toe te passen op de gemiddelde stijfheid per homogeen dijkvak.

Om de berekende stijfheden van de ingegoten basaltbekleding nauwkeuriger te bepalen en is de aanbeveling om de laagdikte van de basaltbekleding nauwkeuriger te bepalen. Dit kan door het uitvoeren van extra boringen en wellicht ook door het uitvoeren van radarmetingen.

4.2 Praktisch model voor temperatuurcorrectie ingegoten basaltbekleding

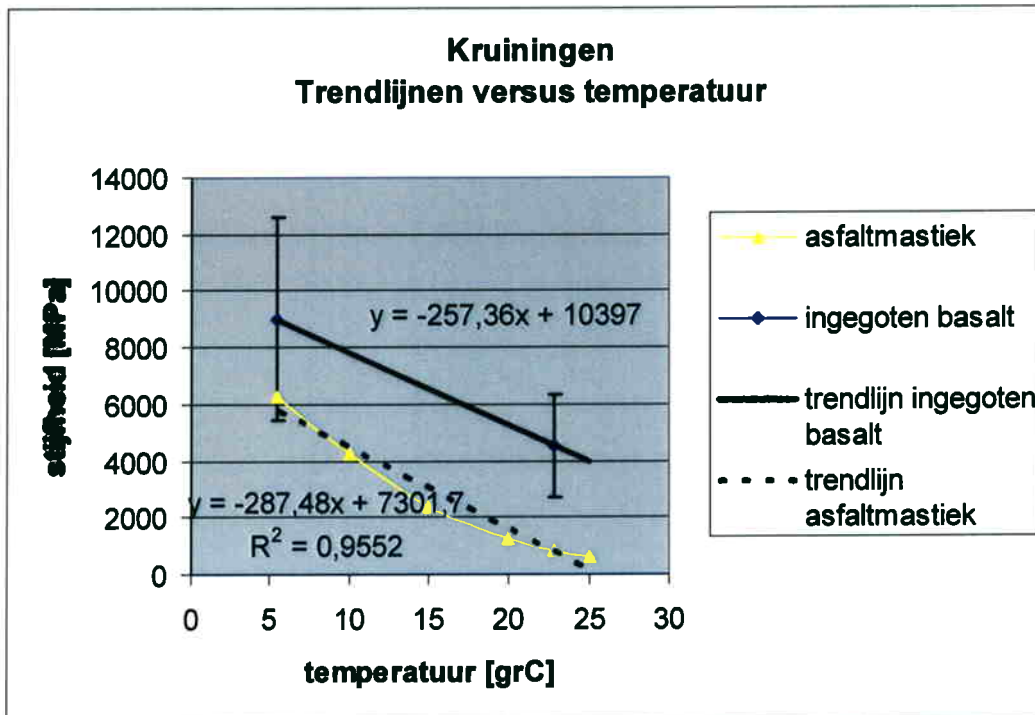
In voorgaande paragraaf is reeds uiteen gezet dat de temperatuurcorrectie het beste uitgevoerd kan worden op de gemiddelde stijfheden per (homogeen) dijkvak. Aan de hand van de metingen te Kruijningen zijn voor een dijkvak van ingegoten basalt de gemiddelde stijfheden bij drie verschillende temperaturen bekend. Aan de hand van deze waarden is de volgende grafiek opgesteld voor de temperatuurcorrectie (zie figuur 4.3).



Figuur 4.3: stijfheden bitumen, mastiek en ingegoten basalt versus de temperatuur

In figuur 4.3 zijn de foutbalken rond de berekende gemiddelde stijfheden aangegeven. Deze spreiding ontstaat doordat niet overal dezelfde hoogte van de ingieting, breedte van de voeg en hechting aanwezig is. De twee punten rond de 30 graden zijn afkomstig van metingen met een plaatdiameter van 450 mm. Het lijkt er uit deze figuur dus op dat de gebruikte plaatsdiameter geen invloed heeft op de teruggerekende gemiddelde stijfheid (bij hoge mastiektemperaturen).

Wat betreft de stijfheid van de bitumen en van de mastiek is te zien dat deze naar nul gaan voor temperaturen boven de 30 à 35 graden Celsius. Dit betekent dat de stijfheid van een ingegoten basaltbekleding voor temperaturen boven de 30 à 35 graden Celsius de stijfheid van een niet ingegoten bekleding zal gaan benaderen (in figuur 4.3 ontbreekt dus een horizontaal lopende tak waar vanaf een bepaalde temperatuur waarboven de stijfheid van de ingegoten basaltbekleding niet verder af neemt). Er wordt dan ook aangeraden om de metingen niet meer uit te voeren bij temperaturen boven 30 graden Celsius van de mastiek.



Figuur 4.4: verloop van de stijfheden van mastiek en ingegoten basalt te Kruiningen

Wat betreft het verloop van de stijfheden van de asfaltmastiek en de ingegoten basalt versus de temperatuur valt op dat de trendlijnen tussen de 5 en 25 graden Celsius redelijk parallel aan elkaar lopen (zie richtingscoëfficiënt in figuur 4.4). Indien voor de ingegoten bekleding te Kruiningen valgewichtmeting zijn uitgevoerd tussen de 5 en 25 graden Celsius, kan voor de stijfheid bij 5 graden Celsius een goede schatting worden gemaakt door de stijfheid evenwijdig aan de trendlijn van de mastiek te verplaatsen. Dit lijkt een redelijk goede inschatting aangezien de spreiding van de gemeten stijfheden enkele malen (2 à 3) groter is dan de fout die ontstaat door deze methode.

De denkbeelden achter deze methode zijn als volgt:

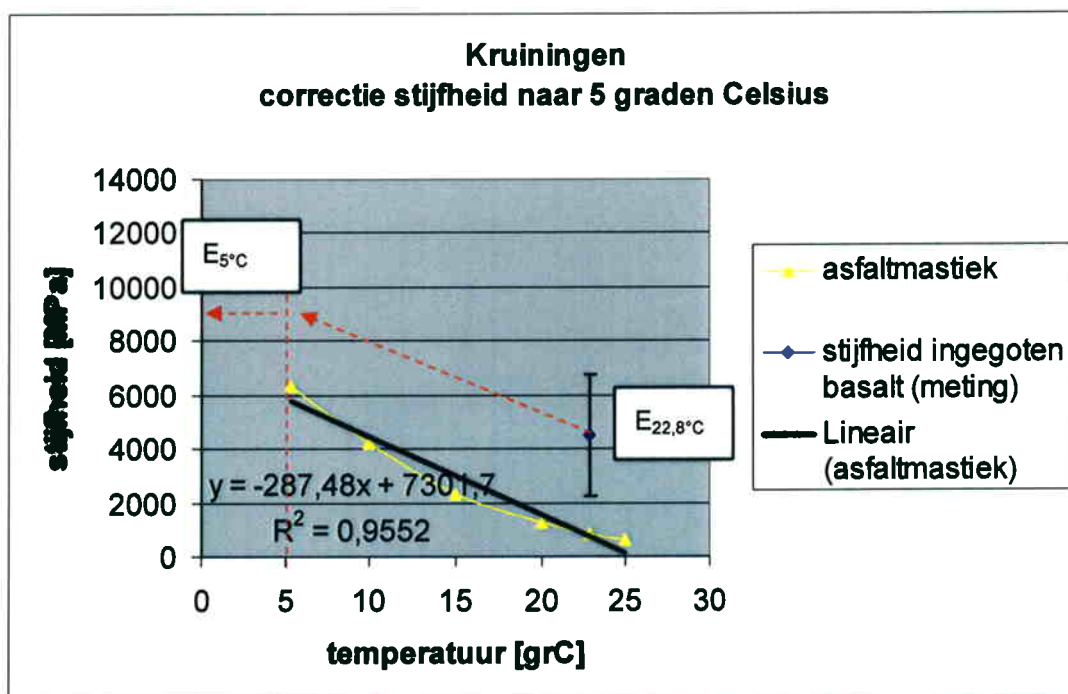
1. Alle rekken (en daarmee de verplaatsingen die leiden tot deflecties) treden op in de mastiek. Als de mastiek door een temperatuurverhoging minder stijf wordt zal de bekleding als geheel in dezelfde mate minder stijf moeten worden (vandaar de parallelle lijnen voor de mastiekstijfheid en de stijfheid van de ingegoten basalt versus de temperatuur).
2. Indien de temperatuur van de mastiek hoog is zal de stijfheid van de mastiek laag zijn zodat deze niet meer bijdraagt aan de stijfheid van de bekleding. De mastiek zal zich eerder als glijlaag gedragen tussen de basaltzuilen. De berekende stijfheden zijn dan "fictieve buigstijfheden" die niet temperatuur gecorrigeerd kunnen worden. Dit houdt in dat de metingen in het vervolg niet bij mastiektemperaturen boven de 25 à 30 graden Celsius uitgevoerd dienen te worden.

Deze methode zal echter wel verder geverifieerd moeten worden aangezien deze berust op twee in situ FWD-metingen en de daaruit berekende stijfheden en één mengselsamenstelling

van de mastiek (te Kruiningen). Er dient nagegaan te worden of dit ook voor de andere bekledingen en mastieksamenstelling op gaat. Indien deze methode nauwkeurig genoeg is, is uit een FWD-meting ($5^{\circ}\text{C} < T_{\text{mastiek}} < 25^{\circ}\text{C}$), de bitumeneigenschappen en de mastieksamenstelling de stijfheid van de ingegoten bekleding in te schatten bij 5°C .

De voorgestelde methode voor de temperatuurcorrectie wordt als volgt:

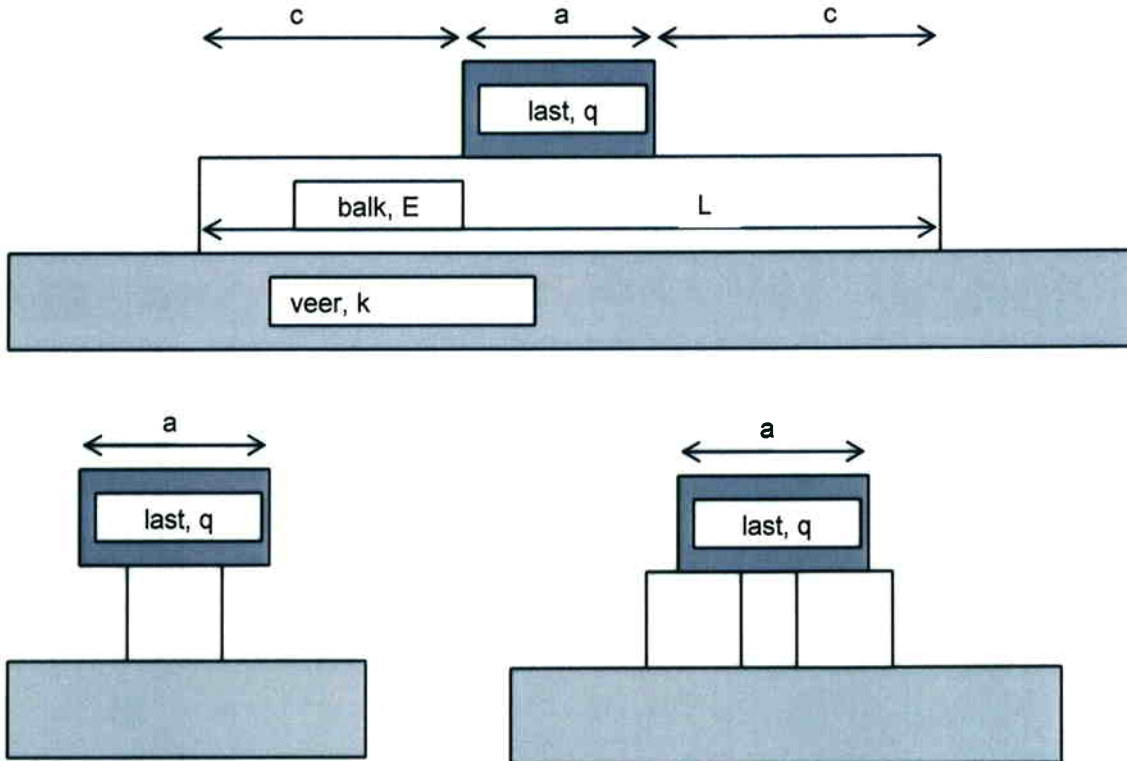
1. Uitvoeren van FWD-metingen waarbij de temperatuur van de mastiek (op 6 cm diepte) tussen de 5 en 25°C ligt. Minimaal dient de temperatuur aan het begin en het eind van de meting vastgelegd te worden.
2. Bepalen van de gemiddelde stijfheden van de ingegoten bekleding (zoals aangegeven in hoofdstuk 3).
3. Bepalen van de mengseleigenschappen van de bitumen, te weten:
 - a. Verwekingspunt ring en kogel;
 - b. Penetratie bij 25°C .
 - c. Bepalen van de stijfheid van de bitumen bij 5, 10, 15, 20 en 25°C met de nomogrammen van Van der Poel.
4. Bepalen van de samenstelling van de mastiek:
 - a. Percentage [v/v] bitumen;
 - b. Percentage [v/v] aggregaat.
 - c. Bepaling van de stijfheid van de Mastiek bij 5, 10, 15, 20 en 25°C met de nomogrammen van Bonnaure.
5. Bepalen van de (richting coëfficiënt van de) trendlijn van het verloop van de mastiekstijfheid versus de temperatuur.
6. Correctie van de gemiddeld gemeten stijfheid bij de meettemperatuur naar een verwachte stijfheid van de ingegoten basaltbekleding bij 5°C . (vb. zie figuur 4.5)



Figuur 4.5: correctie gemeten stijfheid naar temperatuur van 5°C

5 Invloed van de plaatdiameter op de berekende stijfheid

Uit figuur 4.3 lijkt het effect van de plaatdiameter te verwaarlozen. Kennelijk wordt ofwel het oppervlak onder de plaat toch volledig geraakt, ofwel wordt een evenredig aantal basaltstenen geraakt door een grotere plaat als door een kleinere.



Figuur 5.1: last op een korte balk; op één blok en op twee blokken

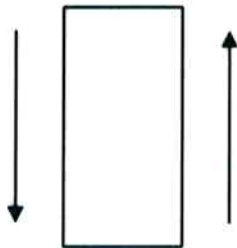
De vervorming onder een korte balk dan wel een oneindig lange balk met een q-last is:

$$w = \frac{q}{k} \left(1 - 2 \frac{\sinh\left(\frac{c}{L}\right) \cos\left(\frac{a}{2L}\right) \cosh\left(\frac{l}{2L}\right) + \sin\left(\frac{c}{L}\right) \cosh\left(\frac{a}{2L}\right) \cos\left(\frac{l}{2L}\right)}{\sinh\left(\frac{l}{L}\right) + \sin\left(\frac{l}{L}\right)} \right)$$

$$w = \frac{q}{k} \left(1 - \exp\left(-\frac{a}{L}\right) \cos\left(\frac{a}{L}\right) \right)$$

Met $L = a$ is dan $w = 0,63 q/k$. Onder één dan wel 2 blokken (veermodel) is $w = q/k$ resp. $w = 0,5 q/k$. Bij lage stijfheden (losse blokken of hoge temperaturen) is een simpel veermodel voldoende. Bij hoge mastiekstijfheden is een plaat- of liggermodel nodig.

noot: Deze interpretatie is een andere dan het foute gebruik van een afschuifligger. Afschuiving kan een model zijn voor elementen in een vlak of een ruimte, maar niet voor een liggerelement als daar geen externe schuifkrachten op werken. In figuur 5.2 is geen momentenevenwicht.



Figuur 5.2: liggermoot met enkel dwarskrachten; levert geen momentenevenwicht

Om nu een inzicht te krijgen in wat de invloed is van het gebruik van een andere plaatdiameter wordt gekeken naar de formule voor een oneindig lange balk. Hierbij wordt aangenomen dat de ingegoten basaltbekleding zich zal gedragen als oneindig lange balk en de verhoudingen van de teruggerkende stijfheid geschat kan worden aan de hand van:

$$S :: w = \frac{F}{ka} \left(1 - \exp\left(-\frac{a}{L}\right) \cos\left(\frac{a}{L}\right) \right)$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{F_1}{F_2} \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{a_1}{L}\right) \cos\left(\frac{a_1}{L}\right) \right)}{\left(1 - \exp\left(-\frac{a_2}{L}\right) \cos\left(\frac{a_2}{L}\right) \right)} \approx \frac{F_1}{F_2} \frac{a_2}{a_1} 0,7$$

Indien dezelfde contactspanning onder de plaat wordt aangehouden is de verhouding:

$S_1 = 0,7S_2$ oftewel de grotere plaatdiameter zal 0,7 à 1,0 keer de stijfheid van de kleine plaatdiameter opleveren.

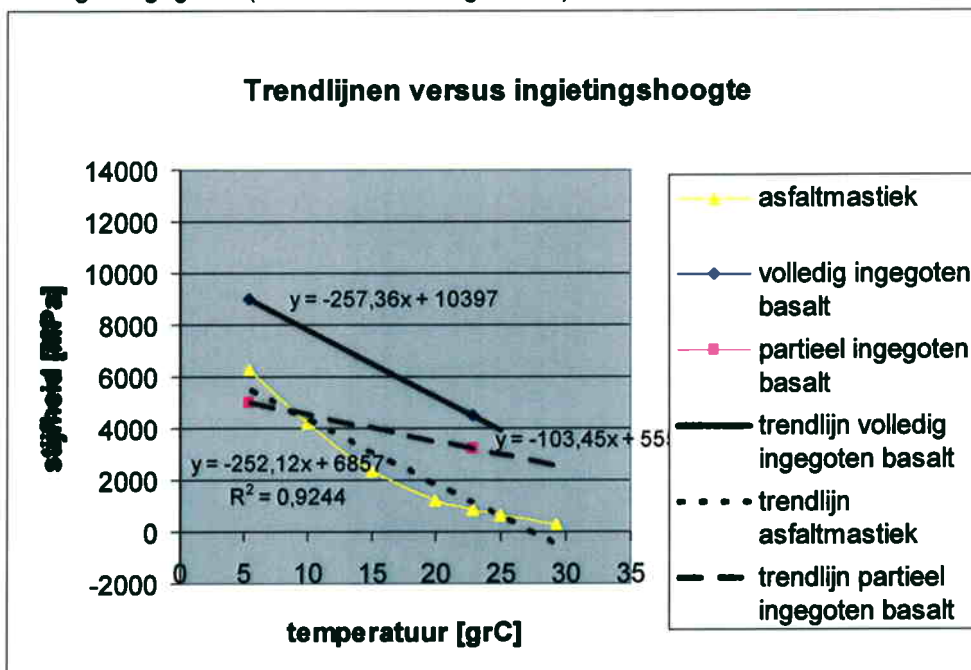
6 Conclusies en aanbevelingen

Geconcludeerd kan worden dat er naast de temperatuur van de mastiek zeer veel variabelen zijn die de berekening van de stijfheden voor de ingegoten basaltbekleding beïnvloeden. Hieronder zijn deze variabelen op een rij gezet:

1. variatie in hoogte van de basaltzuilen;
2. (variatie) in dikte van de filterlaag;
3. ingietingsdiepte van de mastiek tussen de zuilen;
4. breedte van de voeg tussen de zuilen;
5. hechting tussen mastiek en basaltzuilen;

Bij veel metingen is de dikte van de aanwezige filterlaag niet bepaald maar geschat. Daarnaast is het aantal boringen voor de bepaling van de zuilhoogte beperkt. Deze beperkingen zullen de berekening van de laagstijfheden qua nauwkeurigheid ongunstig beïnvloeden. Er wordt dan ook aanbevolen om deze grootheden nauwkeuriger te bepalen door meer te boren of wellicht door het uitvoeren van radarmetingen.

Een probleem blijft echter de hoogte van de ingieting, breedte van de “voeg” en effectiviteit van de hechting van de mastiek aan de basaltzuilen. Deze drie aspecten zitten echter verwerkt in de gemiddeld berekende stijfheid (des te kleiner de ingieting des te kleiner de effectieve hoogte en des te lager de berekende stijfheid). Toch zorgen de ingietingshoogte en de voegbreedte waarschijnlijk nog voor een andere invloed. Verwacht wordt dat naarmate de ingietingshoogte en voegbreedte groter is de bekleding gevoeliger is voor temperatuurwisselingen. Bij een volledige ingietingshoogte gelijk aan de basaltzuil zal de stijfheid van de bekleding groter zijn maar sneller afnemen naarmate de temperatuur toeneemt dan wanneer de bekleding niet volledig is ingegoten (zie voorbeeld in figuur 6.1).



Figuur 6.1: verwacht stijfheidsverloop versus T voor verschillende ingietingshoogtes

Aan de hand van figuur 6.1 lijkt het nu of de methode van het volgen van de trendlijn niet meer mogelijk is, immers de richtingcoëfficiënt van de partieel ingegoten basaltbekleding komt niet meer overeen met de richtingcoëfficiënt van de trendlijn van de mastiek. Dit probleem is op te lossen door de ingietingshoogte te vertalen in een constante waarmee de richtingcoëfficiënt vermenigvuldigd moet worden voordat de correctie van de stijfheid van de ingegoten basalt kan plaatsvinden. Om deze constante te bepalen zal op verschillende bekledingen met verschillende ingietingshoogtes bij verschillende temperaturen gemeten moeten worden. Er wordt dan ook aanbevolen om op de reeds gemeten bekledingen (Vlissingen, Colijnsplaat, Kruiningen en Kattendijke) na te gaan wat de gemiddelde ingietingshoogtes zijn en aan de hand daarvan te bepalen welke bekledingen in aanmerking komen voor metingen bij een andere temperatuur dan de vorige metingen om zodanig de factor voor de ingietingshoogte te bepalen.