

Asfaltwegenbouw



op weg naar professionalisering

**Op basis van mechanische eigenschappen het bepalen van
temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse
asfaltmengsels**

In het kader van ASPARi:

Uitgevoerd bij:

UNIVERSITEIT TWENTE.



Ooms

Nederland Holding bv

F.R. Bijleveld
Afstudeerrapport
Universiteit Twente
Februari 2010

Product: Afstudeerrapport

Opleiding: Universiteit Twente
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Civiele techniek

Titel: Asfaltwegenbouw, op weg naar professionalisering -
Op basis van mechanische eigenschappen het bepalen van temperatuur- en
tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels

Auteur: F.R. Bijleveld
Studentnummer: 0160911

Afstudeercommissie: Prof. dr. ir. A.G. Dorée Universiteit Twente Voorzitter
dr. ir. A.H. de Bondt Ooms Nederland Holding bv Extern begeleider
dr. ir. H.L. ter Huerne Universiteit Twente Begeleider
ir. S.R. Miller Universiteit Twente Begeleider

Status: Definitief

Aantal pagina's rapport: 86
Aantal pagina's hoofdtekst: 64

Datum uitgave: 10 februari 2010

Voorwoord

Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek uitgevoerd ter afronding van de studie Civiele techniek aan de faculteit Construerende technische wetenschappen van de Universiteit Twente. Het rapport beschrijft een procedure waarop temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels bepaald kunnen worden. Naast dit rapport is er een aparte rapportage als appendix met het gehele literatuuronderzoek en empirisch onderzoek als achtergrondmateriaal bijgevoegd, zodat geen informatie verloren gaat.

Dit rapport is bruikbaar voor de asfaltsector als geheel. Opdrachtgevers, opdrachtnemers en adviesbureaus krijgen meer inzicht in de problematiek rondom het verdichten van asfalt met als uiteindelijke doel om de eindkwaliteit van asfaltverhardingen te verbeteren.

Het onderzoek is uitgevoerd bij Ooms Nederland Holding bv vallende onder de koepelorganisatie Ooms Avenhorn Groep. Bij deze wil ik Ooms Nederland Holding bv bedanken voor het gebruik van het laboratorium te Scharwoude en het faciliteren van mijn afstudeeronderzoek. Verder wil ik de CE-asfaltonderzoek v.o.f. bedanken voor het gebruik van het Walssector-verdichtingsapparaat WSV-2008-50/500 en de laboratoriummenger GZM-30⁺. Ook wil ik ASPARi bedanken voor het gebruik van de Linescanner, de warmtebeeldcamera, het weerstation en de hulp bij de praktijkmeting.

Zonder de inspanningen van Ooms Nederland Holding bv zou dit onderzoek niet mogelijk zijn geweest. Daarom ben ik een dankwoord aan de organisatie als geheel verschuldigd en aan een aantal mensen in het bijzonder. Ten eerste wil ik de laboranten bedanken die mij enorm hebben geholpen bij het uitvoeren van zowel de proeven in het laboratorium als de meting in de praktijk; Esther, André, John, Peter en Fred, bedankt! Verder wil ik Radjan bedanken voor de dagelijkse kritische blik tijdens het verloop van mijn onderzoek en voor de organisatie binnen het laboratorium. Als laatst wil ik Ari-an de Bondt bedanken voor de enorm kritische blik op mijn verslaglegging en de wil en durf om te investeren in dit afstudeeronderzoek. Met een duidelijke visie, veel kennis, inzet en een beetje durf heb je me laten zien dat investeren op lange termijn in R&D in de bouw wel degelijk bestaat.

Verder gaat mijn dank uit naar de begeleiders vanuit de Universiteit Twente. Dhr. Dorée wil ik bedanken voor de scherpe blik naar het grotere geheel van het onderzoek, Dhr. Ter Huerne wil ik bedanken voor detaillistische kennis en input en Seirgei Miller wil ik bedanken voor zijn inzet en enorme enthousiasme.

Als laatst wil ik een aantal belangrijke mensen uit mijn persoonlijke omgeving bedanken. Ten eerste wil ik mijn ouders bedanken voor de mogelijkheid om te gaan studeren en de doorlopende aanmoediging en ondersteuning. Verder wil ik mijn broers, Gerard en Martin, bedanken voor de wekelijkse interesse in de voortgang van mijn onderzoek en de ondersteuning die zij mij bieden. Als laatst wil ik mijn beste vriendin Marleen bedanken voor het feit dat ze altijd voor me klaar staat.

Ik wil afsluiten met een verwijzing naar het citaat op de volgende bladzijde van Albert Einstein uit "The evolution of physics" (1938). Ik hoop dat het in dit rapport gelukt is om de problematiek en het belang van het verdichten van asfalt begrijpelijk uiteen te zetten.

Veel leesplezier!

Frank Bijleveld

Scharwoude, januari 2010

Albert Einstein (1938)

*“Most of the fundamental ideas of science are essentially simple,
and may, as a rule, be expressed in a language comprehensible to everyone”*

*“De meest fundamentele ideeën van de wetenschap zijn in wezen eenvoudig,
en kunnen in de regel worden uitgedrukt in een taal die voor iedereen begrijpelijk is”*

Samenvatting

Op dit moment zijn er een aantal belangrijke veranderingen gaande in de wegenbouw waardoor de werkvelden van opdrachtgevers en opdrachtnemers veranderen. De opdrachtgever blijkt zich te concentreren op haar kerntaken (besturen en exploiteren) en de opdrachtnemer maakt het ontwerp en voert het uit, waarbij de opdrachtnemer meer afgerekend wordt op de kwaliteit die wordt geleverd. Naar aanleiding van deze veranderingen heeft APSARi (werkgroep geïnitieerd vanuit de Universiteit Twente) in een studie geconcludeerd dat een verdere professionalisering van de asfaltwegenbouw nodig is om in te spelen op de veranderingen in de markt en dat het asfaltverwerkingsproces hierin een belangrijke component is.

Tijdens dit productieproces op de weg zelf ligt, onder minder gunstige omstandigheden, de verdichting van het asfalmengsel onder druk, zodat het te verwachten resultaat soms onzeker is. Het is daarom van belang om naar een methodegerichte manier van werken te streven, zodat ook onder minder gunstige omstandigheden zonder veel risico gewerkt kan worden en de asfaltondernemer zelflerend wordt. Binnen dit verdichtingsproces lijkt de temperatuur waarop het asfalmengsel verdicht wordt, belangrijk te zijn voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding. Het idee bestaat dat er een venster van temperaturen is, en dus een tijdsvenster, waarop, met een hoge mate van waarschijnlijkheid, de beoogde mengseleigenschappen uit het ontwerp 100% bereikt kunnen worden.

Het doel van dit onderzoek is dan ook 'het ontwikkelen van een procedure om de temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfalmengsels te kunnen bepalen'. Om dit te bereiken is een literatuuronderzoek en een empirisch onderzoek, met geavanceerde laboratoriumexperimenten en praktijkmetingen, gedaan. De ontwikkelde procedure helpt in een aanpak naar methode gebaseerde werkwijzen, zodat, in het kader van risicobeheersing, het te verwachten resultaat betrouwbaarder wordt. De werking en merites van de procedure is aangetoond door het bepalen van het temperatuur- en tijdsvenster voor een STAB 0/16 mengsel zonder PR (AC 16 base 40/60). Het temperatuurvenster voor dit mengsel loopt van 150-140 °C tot 60 °C. Theoretisch loopt het tijdsvenster op een relatief koude dag van 5-10 minuten na spreiden om te beginnen met verdichten tot om en nabij anderhalf á twee uur na spreiden om het verdichtingsproces af te ronden. Uit metingen blijkt dat verdichten buiten het temperatuurvenster kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Er is voor dit mengsel geen relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de weerstand tegen spoorvorming gevonden.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de temperatuur tijdens verdichting sterk van belang is voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding, ongeacht of de streefdichtheid behaald kan worden. Het is daarom niet voldoende om alleen de dichtheid te controleren, maar er zal ook rekening gehouden moeten worden met de verdichtingstemperatuur, afhankelijk van het potentiële schademechanisme.

De belangrijkste consequentie, op basis van dit onderzoek, voor de huidige manier van werken is dat de wegenbouwsector zich dient te realiseren dat de temperatuur waarop het asfalmengsel verdicht wordt de eindkwaliteit van de asfaltverharding sterk kan bepalen. Daarom is het van belang om deze temperatuur tijdens het proces te monitoren en expliciet vast te leggen met als doel om eventueel bij te kunnen sturen. Hierbij zijn nieuwe meettechnologieën, zoals een linescanner, infraroodcamera's en thermokoppels, van belang. De belangrijkste risico's die gelopen worden wanneer dit mogelijke probleem in het verwerkingsproces niet verbeterd wordt, zijn onverwachtse toekomstige wegwerkzaamheden, discussie over de garantie van het werk, en dus een andere financiële afrekening van het werk, en het onbedoeld accepteren van eventuele verborgen gebreken.

Een logische vervolgstap voor ASPARi lijkt verder onderzoek te doen, in het kader van risicobeheersing, naar de relatie tussen verwerkingsprocessen en de eindkwaliteit van de asfaltverharding. Dit is van belang voor zowel opdrachtnemers, door de eindkwaliteit te kunnen verbeteren en zonodig op tijd bij te kunnen sturen, alsmede voor opdrachtgevers, door de juiste functionele eisen te kunnen stellen en mogelijke verborgen gebreken in een vroeg stadium te kunnen herkennen.

Summary

Presently important changes are occurring in the Dutch road construction industry, resulting in changing roles of road agencies and contractors. Road agencies currently seem to concentrate on their core tasks (governing and exploitation) and contractors undertake the design and construction. Within these contracts the contractors are more accountable for the quality they deliver. As a result of these changes ASPARi (a research group initiated by the University Twente) concluded that further professionalization of the asphalt paving industry is necessary to keep up with the changes in the market. They also concluded that the paving process on the construction site is an important issue. The process of compaction is an activity that is increasingly under pressure by which the expected result sometimes becomes insecure. For this reason, it is important to work towards standardized methods and procedures. The aim is to reduce the risks, even under less than ideal circumstances, and facilitate a self-learning mechanism for the contractor.

Within the compaction process, the compaction temperature seems to be important for the final quality of the pavement. The theory points to an optimal compaction temperature frame, logically resulting in an optimal compaction time frame. If we compact in these frames the intended design properties of the asphalt mixture are, with a high degree of probability, 100% gained.

The goal of this research is 'To develop a procedure to determine the optimal temperature- and time frames for Dutch asphalt mixtures'. To reach this goal, we conducted a literature review and an empirical research, which includes advanced laboratory experiments and measurements in road construction practice. The developed procedure contributes to a method-based process, in which the expected result becomes more certain, also important in the light of risk control. The functioning and merits of the procedure are demonstrated for an asphalt mixture with 16 mm maximum size coarse aggregate and 4,5% bitumen (AC 16 base 40/60 pen). The optimal temperature to start the compaction process for this asphalt mixture is 150-140 °C, and to end the compaction process the optimal temperature is 60 °C. Theoretically the optimal compaction time frame to start the compaction process, on a relatively cold day according to Pavecool, is 5-10 minutes after spreading and to end the compaction process about one and a half to two hours after spreading. Asphalt mixture measurements show that starting with the compaction process at a higher or lower temperature than the optimal temperature the cracking toughness can be reduced by 40% and can increase crack propagation rate by 30%. For this asphalt mixture we found no relation between the compaction temperature and permanent deformation, a measure for rutting.

We conclude that the compaction temperature is very important for the final quality of the pavement, irrespective the degree of compaction is obtained. Therefore, it is not sufficient to only check the degree of compaction afterwards, to ensure quality. It is also important to take the compaction temperature into account, depending on the damage mechanisms of the asphalt mixture.

The most important consequence for current construction practice is that the road construction market must realize that the compaction temperature is important for the final quality of the pavement. Thus, it is important to monitor and explicitly document the compaction temperature during the compaction process, which enables the contractor to intervene in the process if necessary. New measuring technologies, for example linescanners, infrared cameras and thermocouples, are important to monitor and document this compaction temperature. If the current process is not improved main risks are, unexpected future roadworks, discussion about the guarantee of the project possibly resulting in financial consequences, and unintentional acceptance of possible concealed defects.

A logical step for ASPARi to further professionalize the road construction industry appears to conduct further research into the relationship between processes on the road and the final quality of the pavement. This is important both for contractors, to improve the quality of the final product and if necessary intervene in the process, and for road agencies, to specify the correct functional requirements and detect concealed defects early in the construction process.

Inhoud

1	Onderzoeksontwerp	1
1.1	<i>Onderzoekskader en doelstelling.....</i>	1
1.2	<i>Onderzoeksmodel.....</i>	6
1.3	<i>Vraagstelling</i>	7
1.4	<i>Onderzoeksstrategie.....</i>	10
1.4.1	<i>Literatuuronderzoek.....</i>	10
1.4.2	<i>Empirisch onderzoek.....</i>	10
1.4.2.1	<i>Experimenten.....</i>	11
1.4.2.2	<i>Gevalsstudie.....</i>	12
1.4.3	<i>Analyse.....</i>	13
1.5	<i>Afsluiting onderzoeksontwerp en leeswijzer voor het rapport.....</i>	15
2	Theorie over de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting.....	17
2.1	<i>Het asfaltmengsel</i>	17
2.1.1	<i>Bouwstoffen van het asfaltmengsel</i>	17
2.1.2	<i>Gedrag van asfaltmengsels</i>	18
2.1.3	<i>Soorten asfaltmengsels</i>	19
2.2	<i>Het verdichtingsproces.....</i>	21
2.2.1	<i>Dichtheid van het asfaltmengsel.....</i>	21
2.2.2	<i>Verwerkings- en verdichtingsproces van asfalt.....</i>	22
2.2.3	<i>Fasen van verdichting.....</i>	24
2.2.4	<i>Verdichtingsmethoden in het laboratorium.....</i>	25
2.3	<i>De temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting.....</i>	26
2.4	<i>Conclusie theorie</i>	29
3	Empirische onderzoeken – laboratorium en praktijk	31
3.1	<i>Proeven en meetinstrumenten.....</i>	31
3.2	<i>Laboratoriumonderzoeken</i>	35
3.2.1	<i>Doel en concept laboratoriumonderzoek.....</i>	35
3.2.2	<i>Resultaten laboratoriumonderzoek</i>	36
3.2.2.1	<i>Temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verwerking</i>	36
3.2.2.2	<i>Verdichting en dichtheid.....</i>	36
3.2.2.3	<i>Mechanische eigenschappen.....</i>	39
3.2.3	<i>Conclusies laboratoriumonderzoek.....</i>	43
3.3	<i>Praktijkmeting.....</i>	44
3.3.1	<i>Doel en concept praktijkmeting</i>	45
3.3.2	<i>Resultaten praktijkmeting.....</i>	45
3.3.2.1	<i>Temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verwerking</i>	45
3.3.2.2	<i>Verdichting en dichtheid.....</i>	46
3.3.2.3	<i>Mechanische eigenschappen.....</i>	48
3.3.3	<i>Conclusies praktijkmeting</i>	50
3.4	<i>Vergelijking laboratoriumonderzoeken en praktijkmeting.....</i>	52
3.5	<i>Conclusies empirische onderzoeken</i>	53
4	Analyse temperatuur- en tijdsvenster van het onderzochte mengsel	55
4.1	<i>Temperatuurvenster van het onderzochte mengsel</i>	55
4.2	<i>Tijdsvenster van het onderzochte mengsel</i>	55

5	Procedure bepaling temperatuur- en tijdsvensters Nederlandse asfaltmengsels.....	57
6	Conclusies en aanbevelingen.....	58
6.1	<i>Conclusies van het onderzoek.....</i>	58
6.2	<i>Verbetervoorstellen huidige bouwpraktijk.....</i>	60
6.3	<i>Aanbevelingen voor verder onderzoek.....</i>	60
7	Consequenties voor de wegebouwsector	62
7.1	<i>Huidige wegebouwsector.....</i>	62
7.2	<i>Focus en conclusies van het onderzoek.....</i>	62
7.3	<i>Consequenties voor de wegebouwsector</i>	63
7.4	<i>Tot slot.....</i>	64
	Literatuurlijst.....	65
	Bijlagen	67
	<i>Bijlage 1.1: Vergelijkingsgrondslag procesverbeteringen (Bate et al, 1995)</i>	68
	<i>Bijlage 1.2: Onderzoeksvragen samengevat.....</i>	70
	<i>Bijlage 2.1: Fasen verdichtingsproces volgens Ooms.....</i>	71
	<i>Bijlage 3.1: Fotoreportage proces laboratoriumonderzoek.....</i>	73

1 Onderzoeksontwerp

In dit hoofdstuk is het onderzoeksontwerp voor dit afstudeeronderzoek gepresenteerd. Het doel van dit onderzoeksontwerp is het presenteren van een adequaat onderzoeksplan volgens een planmatige aanpak. Ten eerste is het te onderzoeken probleem, het onderzoekskader en het doel van het onderzoek beschreven, vervolgens is ingegaan op het onderzoeksmodel, de onderzoeksvragen en de onderzoeksstrategie. Uiteindelijk is een leeswijzer voor dit verslag beschreven.

De grondhouding voor dit onderzoek is gedefinieerd als: ‘Het voornemen om een bijdrage te leveren aan de oplossing van een probleem’.

1.1 Onderzoekskader en doelstelling

Een betrouwbare en efficiënte infrastructuur is voor moderne industrielanden noodzakelijk. Mobiliteit vormt een cruciale conditie voor de sociale en culturele ontwikkeling van de maatschappij (Ter Huerne, 2004). Infrastructuur met een lange levensduur, een hoge betrouwbaarheid en weinig opont-houd lijkt daarom belangrijk, maar niet altijd vanzelfsprekend. Onderzoek naar asfaltwegen met een lange levensduur en goede prestaties is daarom dus belangrijk.

Tegenwoordig zijn er veel veranderingen gaande in de wegenbouw. Een terugtrekkende overheid, een wil om transparant te zijn, een steeds grotere rol voor informatie en communicatietechnologie, een krimpende arbeidsmarkt en vergrijzing met veel robotisering als gevolg (Verbaan, 2008). Hiermee veranderen de werkvelden van opdrachtgevers en opdrachtnemers in de wegenbouw. Traditioneel was de opdrachtgever verantwoordelijk voor het maken van het ontwerp en de opdrachtnemer voor de uitvoering van het ontwerp. In de nieuwe samenwerkingsvormen concentreert de opdrachtgever zich op besturen (overheden) en de opdrachtnemer op het produceren en realiseren van het ontwerp. Hierin heeft de opdrachtnemer veel risico's overgenomen van de opdrachtgever, maar daarentegen heeft de opdrachtnemer wel vrijheid in de keuze van het (ontwerp van het) asfaltmengsel, de constructie en uitvoeringswijze, waardoor eigen producten ontwikkeld kunnen worden en verbeterd kunnen worden (Dorée et al., 2008). Daarnaast is het ontwerpproces voor de mengsels van het asfalt gericht op methoden en procedures, maar opvallend is dat de verwerking van het asfalt (aanleg, walsen, etc.) daarentegen met name gebaseerd is op ervaring. Belangrijke karakteristieken hierbij zijn ‘learning by doing’, impliciet werken en werken op gevoel, en de ervaring wordt met name gebaseerd op ‘trial and error’ (De Man, 2008). Gevolg hiervan is dat er voldoende herhaling moet zijn om te kunnen werken op basis van ervaring, en dus is er een lange en kostbare leercyclus nodig. Daarnaast kunnen afwijkingen van het product ten opzichte van het beoogde product moeilijk waargenomen en geregistreerd worden. Ook is het moeilijk door het projectgewijs werken in de bouw om projecten te vergelijken waardoor er te weinig herhaling is om te bepalen of het resultaat beter of slechter is dan vorige keer. Daarom lijkt een standaardisering (d.m.v. methoden en procedures) belangrijk voor het verbeteren van het verwerkingsproces van asfaltmengsels.

Door de toename van de risico's voor de opdrachtnemer, de toename van de hoeveelheid mengsels en het werken op basis van ervaring dienen opdrachtnemers hun proces meer en beter te monitoren in de nieuwe samenwerkingsvormen, zodat de beoogde kwaliteit van de opdrachtgever gerealiseerd wordt, maar ook de kwaliteit van het werk gekeurd wordt, zodat aangetoond kan worden dat de gevraagde kwaliteit (op)geleverd is. Opdrachtnemers zullen dus moeten streven naar een (beter) beheersing van de kwaliteit binnen het gehele asfaltverwerkingsproces. Een werkgroep binnen de Universiteit Twente (ASPARi) heeft in een studie geconcludeerd dat een verdere professionalisering van de asfaltwegenbouw nodig is om in te spelen op de veranderingen in de markt en dat het asfaltverwerkingsproces hierin een belangrijke component is (Ter Huerne en Dorée, 2005). De werkgroep is bezig met het in kaart brengen van het asfaltverwerkingsproces en de mogelijkheden te onderzoeken om de variabiliteit binnen dit asfaltverwerkingsproces terug te dringen, zodat de leercyclus verkleind kan worden en

om afwijkingen tijdens het proces te kunnen alloceren en acties daartegen te ondernemen. Principes van ASPARi zijn het toepassen van SMART (Self Monitoring And Reporting Technologies), het geven van inzicht in het verwerkingsproces en daarmee feedback geven aan het bedrijfsleven, het verminderen van de variabiliteit in het verwerkingsproces, het verbeteren van de productkwaliteit en het verminderen van de risico's (Dorée en ter Huerne, 2005). De kern van deze procesbeheersing is het terugdringen van de variabiliteit in het proces binnen toegestane toleranties (Simons en ter Huerne, 2008). Binnen dit kader valt deze onderzoeksopdracht. Dit onderzoek zal focussen op de procesbeheersing van de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting binnen het verwerkingsproces. Asfalttechnologen zijn het erover eens dat de verdichting van een asfaltmengsel tijdens het verwerkingsproces de belangrijkste factor voor de prestaties van de asfaltlaag is ((Decker, 2006 ; Ter Huerne, 2004), etc.). De dichtheid is gedefinieerd als "de mate waarin korrels in elkaar passen (Van der Velden, 2003)". Verdichting van een asfaltmengsel is het proces waarbij een bepaalde dichtheid wordt bereikt. Het bereiken van een juiste dichtheid optimaliseert de gewenste mengseleigenschappen, zoals sterkte, duurzaamheid, weerstand tegen deformatie, weerstand tegen vocht etc. (Decker, 2006). De juiste dichtheid is in dit onderzoek niet gedefinieerd als de dichtheid met de maximale prestatie of grootste weerstand tegen belastingen, maar als een ideale, beoogde dichtheid, hetgeen te maken heeft met weerstand tegen verbrijzeling, holle ruimte etc. Een slechte dichtheid leidt tot latere verdichtingen (naverdichting) hetgeen kan leiden tot scheuren (thermal cracking), rafeling, gevoeligheid voor vocht etc. (Decker, 2006) en dit leidt dus tot een kortere levensduur van de asfaltlaag. Een kortere levensduur van de asfaltlaag kost geld, tijd en materiaal, hetgeen de noodzaak van een juiste dichtheid en verdichting is.

Het verdichten van asfalt in de huidige bouwpraktijk is, zoals eerder beschreven, hoofdzakelijk gebaseerd op ervaringskennis. Uit de ervaringen in het verleden opgedaan weet men welk resultaat bij benadering mag worden verwacht zodra onder vergelijkbare omstandigheden met vergelijkbare materialen (mengsels) wordt gewerkt. Zodra echter buiten het ervaringsgebied gewerkt moet gaan worden, is het te verwachten resultaat onzeker. Tegenwoordig komt dit veelvuldig voor, omdat wegwerkzaamheden dienen plaats te vinden onder minder gunstige omstandigheden en omdat nieuwe mengsels regelmatig hun intrede doen (Ter Huerne, 2004). Ook wil men tegenwoordig zo lang mogelijk in het seizoen asfalteren, dus ook onder minder ideale omstandigheden. Door wegwerkzaamheden, de intrede van nieuwe mengsels en het asfalteren onder minder gunstige omstandigheden ligt de verdichting tijdens het asfaltverwerkingsproces onder druk. Daarom zal er meer onderzoek verricht moeten worden naar methodegericht werken tijdens de verdichting van het asfalt, zodat ook onder minder gunstige omstandigheden volgens methoden en procedures gewerkt kan worden en het te verwachten resultaat betrouwbaarder wordt.

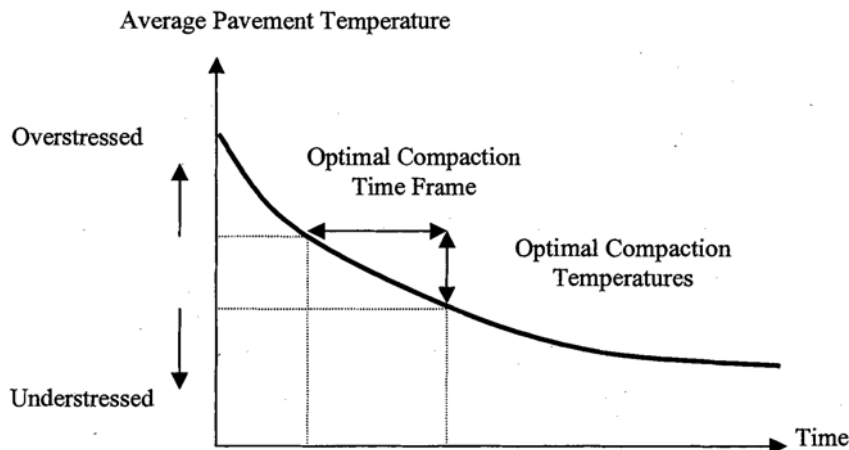
Ter Huerne (2004) heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om het verdichtingsproces van asfalt voor wegconstructies te simuleren. Hierbij is gebruik gemaakt van een model uit de grondmechanica; eindige elementen methode en de kritische staat theorie. Hierin wordt geconcludeerd dat er nog geen alom toepasbaar gereedschap voor de simulatie van verdichtingsprocessen van asfalt beschikbaar is, maar dat het wel een potentieel succesvolle mogelijkheid kan zijn. Volgens Ter Huerne (2004) dienen er nadere inspanningen verricht te worden op de effecten van materiaaltemperatuur op het verdichtingsgedrag van asfalt.

Volgens Kari (1967) kunnen er twee problemen tijdens de verdichting van asfaltmengsels plaatsvinden. Een asfaltmengsel kan overstressed zijn (vaak bij een te warme temperatuur), waarbij het materiaal geen stabiliteit heeft om het gewicht van de verdichter te dragen, en het mengsel kan understressed zijn (vaak bij een te lage temperatuur), waarbij de verdichter niet genoeg kracht heeft om de dichtheid van het asfaltmengsel te vergroten. In koude klimaten (zoals Nederland) komt de understressed-situatie het meest voor, zeker tegen het eind van het asfaltseizoen. Het optimale punt tussen de overstressed-en de understressed-situatie varieert met de verwerkbaarheid van mengsel, het walstype en het aantal walsovergangen. De timing van verdichten tijdens het asfaltverwerkingsproces is dus erg belangrijk, maar over deze timing is in Nederland vooralsnog weinig bekend.

Timm et al. (2001) concluderen dat de temperatuur van het materiaal (het asfaltmengsel) de belangrijkste parameter voor de timing van het verdichten van het asfaltmengsel is. Het belang van deze temperatuur ligt in het verkrijgen van een bepaalde verwerkbaarheid van het asfaltmengsel, in belangrijke mate afhankelijk van de parameter viscositeit (stroperigheid) van het mengsel. Veel (asfalt)technologen spreken over de verwerkbaarheid van asfalt (Simons en ter Huerne, 2008; Sluer, 2007; Ter Huerne, 2004; VBW-asfalt, 2000). VBW-asfalt (2000) verstaat onder verwerkbaarheid van het asfalt de spreidbaarheid en verdichtbaarheid van het asfalt. De spreidbaarheid is een maat voor het gemak waarmee het asfalt door de spreidmachine of met de hand gelijkmatig over de werkbreedte kan worden verdeeld. De verdichtbaarheid is een maat voor het gemak waarmee het gespreide asfalt door het walsen tot een gewenste dichtheid kan worden gebracht (VBW-asfalt, 2000). Dit onderzoek zal zich focussen op de verwerkbaarheid van asfaltmengsels tijdens verdichting. Er zal dus idealiter verdicht moeten worden tussen de understressed- en de overstressed situatie. De temperaturen waarbij deze situaties zich voordoen, vormen de extremen van het temperatuurvenster waarbinnen idealiter verdicht dient te worden. Over het vinden van dit temperatuurvenster gaat dit onderzoek.

In figuur 1.1 is de temperatuur van het mengsel als functie van de tijd schematisch weergegeven met de understressed-situatie, de overstressed-situatie en een optimale situatie. Het idee bestaat dat er een optimaal temperatuurvenster bestaat waarbinnen een ideale, beoogde verdichting plaatsvindt en afhankelijk van de snelheid van afkoelen dus ook een optimaal tijdsvenster. Bij verschillende mengsels en condities verschuift het tijdsvenster om te verdichten langs de tijdsschaal, afhankelijk van de mate van afkoeling. Een optimale verdichting is o.a. afhankelijk van het asfaltmengsel en dus afhankelijk van de maatgevende schadebeelden. Het optimale temperatuur- en tijdsvenster is in figuur 1.1 weergegeven met respectievelijk 'optimale compaction temperatures' en 'optimal compaction time frame'. In de praktijk kan het ook voorkomen dat uiteindelijk een juiste dichtheid is bereikt, maar dat dit onder een te lage of te hoge temperatuur is gebeurd, zodat wel de beoogde dichtheid gehaald wordt, maar waardoor de mechanische eigenschappen van het mengsel achteruit kunnen gaan. Deze negatieve consequenties bij het niet verdichten binnen dit ideale temperatuurvenster zullen dus onderzocht moeten worden. Dit onderzoek focust zich op de mechanische eigenschappen van het asfaltmengsel tijdens de verdichting, zoals sterkte-eigenschappen, viskeuze vervorming, treksterkte, weerstand tegen scheurgroei, etc. Afhankelijk van de maatgevende schadebeelden voor de asfaltlaag kan dit levensduurverkorting tot gevolg hebben en het is van maatschappelijk belang om dit te voorkomen. Dit afstudeeronderzoek richt zich op het mogelijke effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen van het asfalt en niet op de mogelijke levensduurverkorting die dit tot gevolg kan hebben, afhankelijk van het maatgevende schadebeeld.

Daarnaast is een praktisch probleem dat bij het verdichten van een asfaltmengsel een homogene temperatuur van de asfaltlaag zelden voorkomt. Dit komt omdat de bovenkant van de asfaltlaag, en eventueel de onderkant van de asfaltlaag afhankelijk van de ondergrond, sneller afkoelt dan het midden van de asfaltlaag, waardoor verschillende temperaturen in de asfaltlaag ontstaan en dus ook verschillende optimale tijdsvensters om te verdichten. Hierdoor kan het theoretisch zelfs voorkomen dat er geen optimaal tijdsvenster bepaald kan worden, omdat het midden van de laag nog te warm is en de boven- en/of onderkant van de laag al te koud is. Om het ideale moment van verdichten te kunnen bepalen is dus ten eerste kennis nodig over de verschillende temperaturen binnen de asfaltlaag en de afkoeling hiervan en ten tweede is een procedure gewenst om te bepalen hoe er omgegaan dient te worden met verschillende temperaturen (heterogene temperatuurverdeling) in een asfaltlaag. In dit onderzoek is kennis verzameld over de verschillende temperaturen in de asfaltlaag en welke parameters hierop van invloed zijn. Dit onderzoek richt zich niet op het ontwikkelen van een procedure hoe er omgegaan dient te worden met een heterogene temperatuurverdeling.



Figuur 1.1: Afkoeling asfaltmengsel en tijdsvenster verdichting (Timm et al., 2001)

In Nederland is er weinig bekend over de temperaturen waarbinnen idealiter verdicht dient te worden (temperatuurvenster), en daarmee de tijdsvensters om te verdichten, van de verschillende Nederlandse asfaltmengsels. De werkgroep binnen de Universiteit Twente (ASPARi) heeft materieel en ervaring om de temperatuur van het asfalt in de praktijk te meten (o.a. infraroodscanners en warmtebeeldcamera's), maar het probleem is dat onduidelijk is wanneer (bij welke temperaturen en dus ook binnen welk tijdsraam) het mengsel idealiter verdicht dient te worden om de beoogde mengsel-dichtheid en mengseleigenschappen te bereiken. Omdat er velerlei parameters van invloed zijn op het moment van verdichten (de mengseleigenschappen, de meteorologische eigenschappen en, de bestaande ondergrond, maar bijvoorbeeld ook welk materieel gebruikt wordt, etc.) kan moeilijk een generiek model geldend voor alle asfaltmengsels worden ontwikkeld om het moment van verdichten te bepalen. Daarentegen zou voor een bepaald mengsel, onder bepaalde omstandigheden, verdichting met bepaald materieel etc. wel het optimale moment van verdichten bepaald kunnen worden, zodat een procedure voor het bepalen van optimale temperatuur- en tijdsvensters op basis van één mengsel kan worden bepaald.

Een procedure voor het bepalen van het temperatuur- en tijdsvenster voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels is dus gewenst. Daarnaast is het van belang om de negatieve mechanische consequenties te onderzoeken wanneer niet verdicht wordt binnen dit temperatuur- en tijdsvenster.

De probleemstelling die in dit onderzoek beschouwd wordt, is:

“De procedure voor het bepalen van het optimale tijdsvenster om Nederlandse asfaltmengsels te verdichten is onduidelijk.”

Dit onderzoek beoogt het ontwikkelen van een procedure voor het bepalen van tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels door het doen van empirisch onderzoek op één mengsel (laboratoriumexperimenten en een praktijkmeting). Dit tijdsvenster zal worden bepaald op basis van het temperatuurvenster waarbinnen de beoogde mengseleigenschappen worden bereikt. In dit onderzoek is gefocust op de mechanische eigenschappen van het asfaltmengsel. De bepaling van het tijdsvenster op basis van het temperatuurvenster gebeurt met behulp van een bestaand afkoelingsmodel (Pavecool).

Dit leidt dan ook tot de volgende doelstelling van dit onderzoek:

“Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels door het bepalen van het temperatuur- en tijdsvenster voor het verdichten van één Nederlands asfaltmengsel, gestaafd aan laboratoriumexperimenten-”

ten en praktijkcases, en door middel van een bestaand afkoelingsmodel het tijdsvenster van verdichten te bepalen.”

Naast de procedure dienen verbetervoorstellen te worden gedaan, die in de praktijk bruikbaar zijn, met betrekking tot de temperatuur van verdichting, en dus tijd van verdichting, binnen het verwerkingsproces van asfaltmengsels. Procesverbeteringen met betrekking tot temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels zijn dus gewenst.

Bate et al (1995) hebben een model (Capability maturity model) ontwikkeld om procesverbeteringen effectief door te voeren binnen Systems Engineering (SE) en dit kan ook gebruikt worden om procesverbeteringen te beoordelen en evalueren. Dit model is een vergelijkingsgrondslag met vijf niveaus waarop variabelen vergeleken kunnen worden. Deze vergelijkingsgrondslag is beschouwd in bijlage 1.1. Volgens Bate et al (1995) bestaat het vermogen om procesverbeteringen door te voeren uit drie dimensies; mensen, processen en technologieën, hetgeen overeenkomt met de principes van ASPARi. Deze vergelijkingsgrondslag is ontwikkeld om SE toe te passen in de softwaretechniek. Het beschrijft de belangrijkste elementen om procesverbeteringen door te voeren.

Dit onderzoek zal focussen op procesverbeteringen voor het temperatuur- en tijdsvenster van verdichting binnen het verwerkingsproces van asfaltmengsels. De procesverbeteringen met betrekking tot de temperatuur en tijd tijdens de verdichting zullen worden geëvalueerd met behulp van de vergelijkingsgrondslag weergegeven in tabel 1.1. Deze vergelijkingsgrondslag is gebaseerd op het model van Bate et al (1995) toegepast op de ASPARi principes.

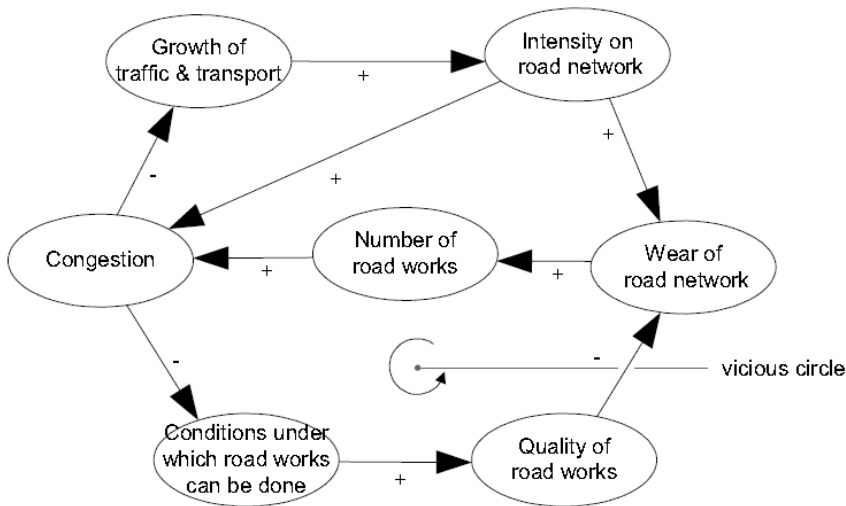
Tabel 1.1: Vergelijkingsgrondslag procesverbeteringen

Niveau	Vermogen om verbeteringen door te voeren	Beschrijving
1	Uitvoerbaar	De procesverbetering is mogelijk
2	Herhaalbaar	De procesverbetering heeft variabiliteit binnen toegestane toleranties en is herhaalbaar
3	Robuust	De procesverbetering blijft bij kleine veranderingen van de (input)variabelen voldoen
4	Efficiënt	De procesverbetering haalt met zo min mogelijk middelen zijn doel
5	Automatische procesbeheersing	De procesverbetering wordt automatisch efficiënt gereguleerd met voortdurende verbetering

Dit onderzoek beoogt verbetervoorstellen te doen met betrekking tot de temperatuur en tijd van verdichten van asfaltmengsels tot en met niveau 3. Procesverbeteringen met betrekking tot de temperatuur tijdens verdichting zullen dus uitvoerbaar, herhaalbaar en robuust moeten zijn.

Onderzoek naar dit probleem lijkt van maatschappelijk belang. Ter Huerne (2004) stelt dat als er gewerkt wordt onder minder ideale omstandigheden de kwaliteit van de verharding negatief beïnvloed wordt, waardoor de frequentie van wegonderhoud omhoog moet. Hierdoor ontstaat een vicieuze cirkel zoals weergegeven in figuur 1.2. Als er dus voor gezorgd kan worden dat de kwaliteit van de wegverharding verbeterd wordt, door op het juiste moment te verdichten, is er minder vaak onderhoud nodig, waardoor minder congestie ontstaat. En een goede infrastructuur zonder veel oponthoud (congestie) is van maatschappelijk (socio-economisch) belang (Ter Huerne, 2004).

Hiermee is dus de relevantie van dit onderzoek aangegeven; Door te verdichten op het juiste moment wordt de kwaliteit van de wegverharding verbeterd, waardoor het gebruik van de wegverharding voor onderhoud minder wordt en het gebruik van de wegverharding om te verplaatsen, waar deze voor bedoeld is, verhoogd wordt, waardoor er minder congestie ontstaat.

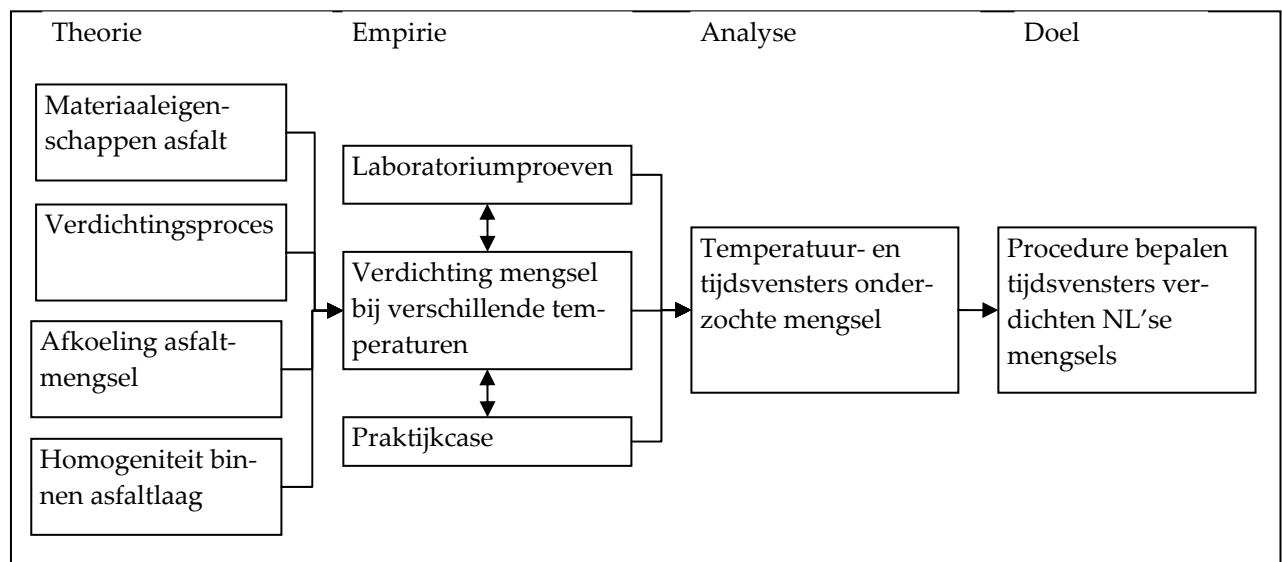


Figuur 1.2: Nut onderzoek (Ter Huerne, 2004)

Nu het te onderzoeken probleem, het doel en het onderzoekskader zijn gedefinieerd en is aangetoond dat het onderzoek nut heeft is een onderzoeksmodel opgesteld. Dit onderzoeksmodel is in de volgende paragraaf beschreven.

1.2 Onderzoeksmodel

Binnen het onderzoekskader en de doelstelling is een onderzoeksmodel opgesteld en deze is weergegeven in figuur 1.3. Het doel van het onderzoeksmodel is het verkrijgen van inzicht in de stappen die gezet moeten worden om de doelstelling te bereiken (Verschuren en Doorewaard, 2007). Dit onderzoeksmodel is opgesplitst in 4 delen; een theoretisch gedeelte, een empirisch gedeelte, een analyserend deel en een deel waarbij conclusies worden getrokken ten opzichte van de doelstelling. Deze vier delen zullen achtereenvolgens globaal worden toegelicht in deze paragraaf.



Figuur 1.3: Onderzoeksmodel

In het theoretische gedeelte is een literatuuronderzoek gedaan naar de vraag hoe het afkoelingsproces van het asfaltmengsel plaatsvindt tijdens het (huidige) verdichtingsproces. Om antwoord op deze vraag te krijgen zijn een viertal aspecten uitgediept; (1) welke materiaaleigenschappen asfaltmengsels

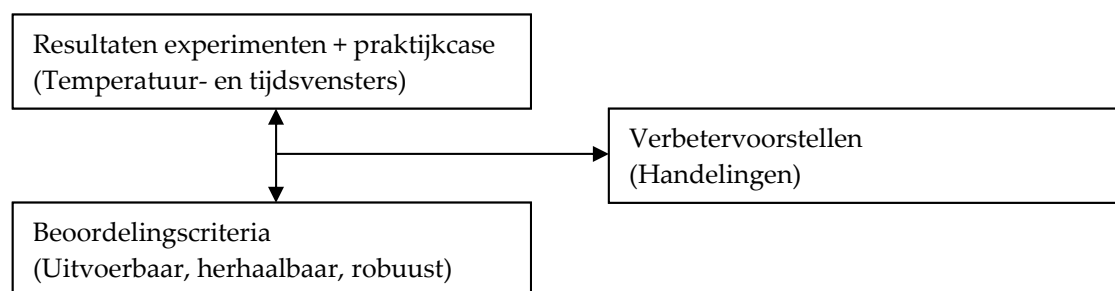
hebben met betrekking tot de dichtheid, (2) hoe het verdichtingsproces (in de huidige bouwpraktijk) plaatsvindt binnen het asfaltverwerkingsproces, (3) hoe de afkoeling van asfaltmengsels plaatsvindt en (4) hoe homogeen, volgens de literatuur, de temperatuur binnen een asfaltlaag afkoelt. Op basis van deze theorie kan voor het empirisch gedeelte bepaald worden op welke materiaaleigenschappen gelet moet worden, hoe er verdicht moet worden zodat de werkelijkheid het best gesimuleerd kan worden en bij welke (verdichtings)temperaturen er proeven gedaan moeten worden.

In het empirisch onderdeel is er empirisch onderzoek op asfaltmengsels gedaan in het laboratorium en bij een case in de praktijk. In het laboratorium is (1) beproefd tussen welke temperaturen de gekozen asfaltmengsels ideaal verdicht worden en (2) wat de negatieve consequenties zijn op de mechanische eigenschappen van het asfaltmengsel wanneer niet verdicht wordt binnen dit ideale temperatuurvenster. In de praktijkcase is (1) het temperatuurvenster toegepast en (2) het effect van verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische kwaliteit in de praktijk bepaald.

Tijdens het derde deel van het onderzoek is de geïnventariseerde data uit het empirisch onderzoek geanalyseerd. Op basis van de laboratoriumproeven en de praktijkmeting is voor het onderzochte mengsel en de onderzochte omstandigheden het temperatuur- en tijdsvenster bepaald door te analyseren onder welke temperatuur de beoogde dichtheidsprogressie en mengseleigenschappen worden behaald. Daarnaast is aangetoond wat de negatieve consequenties zijn bij het niet verdichten binnen het temperatuurvenster. Aan de hand van deze is voor dit mengsel het temperatuur- en tijdsvenster bepaald.

Het vierde deel bestaat uit het trekken van conclusies uit de geanalyseerde dataset ten opzichte van de doestelling. Op basis van de analyse is een werkbare, operationele procedure opgesteld voor het bepalen van tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. De werking van de procedure is empirisch aangetoond door het bepaalde temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden. Daarnaast zijn er conclusies getrokken over de negatieve mechanische consequenties bij het verdichten buiten het temperatuurvenster.

Globaal komen de analyses en het trekken van conclusies neer op figuur 1.4. Uit het doen van het literatuuronderzoek wordt helder waarop gelet moet worden in het laboratoriumonderzoek en de praktijkcase. Uit het laboratoriumonderzoek en de praktijkcase komen een temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel voort die geconfronteerd worden met de beoordelingscriteria (uitvoerbaarheid, herhaalbaarheid en robuustheid). Aan de hand van deze confrontatie kunnen verbetervoorstellen worden gedaan, in de vorm van handelingen, van hetgeen in de toekomst anders moet.



Figuur 1.4: Analyses en het trekken van conclusies

Op basis van dit onderzoeksmodel zijn onderzoeksvragen opgesteld. Deze onderzoeksvragen zijn in de volgende paragraaf beschreven.

1.3 Vraagstelling

Het probleem is dat een procedure voor het bepalen van het ideale moment om een asfaltmengsel te verdichten ontbreekt. Het doel van dit onderzoek is dan ook om een procedure te ontwikkelen om tijdsvensters te kunnen bepalen waarbinnen Nederlandse asfaltmengsels idealiter verdicht dienen te

worden gebaseerd op de temperaturen waarbinnen de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt. Op basis van de doelstelling en het onderzoeksmodel is een hoofdonderzoeksvraag afgeleid, waaruit verschillende deelonderzoeksvragen afgeleid zijn. Het doel van de onderzoeksvragen is het vertalen van de doelstelling in adequate vragen.

De hoofdonderzoeksvraag van dit onderzoek is:

“Volgens welke procedure kunnen temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels worden bepaald?”

Het beoogde resultaat van deze hoofdonderzoeksvraag is een stappenplan om te komen tot tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels. Dit tijdsvenster is gebaseerd op het temperatuurvenster waarbinnen de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt. Hierbij is ook onderzocht wat de negatieve consequenties zijn wanneer niet verdicht wordt binnen dit ideale tijdsvenster. De aanpak is het doen van empirisch onderzoek in het laboratorium en het doen van metingen in de praktijk. De beoogde reikwijdte van de uitkomsten van het onderzoek zijn uitspraken over het tijdsvenster waarbinnen idealiter verdicht dient te worden voor het onderzochte mengsel en praktijkmeting en een generieke procedure om te komen tot tijdsvensters voor het verdichten voor gelijksoortige probleemsituaties (andere Nederlandse asfaltmengsels).

De hoofdonderzoeksvraag is opgesplitst in een aantal centrale onderzoeksvragen met bijbehorende deelvragen gebaseerd op het onderzoeksmodel. Hierbij zijn per onderzoeksvraag het beoogde resultaat en de aanpak om dit resultaat te bereiken beschreven.

Onderzoeksvraag 1: Theorie

1. Welke parameters zijn van invloed op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces?
 - 1.1 Wat is asfalt en welke materiaaleigenschappen heeft een asfaltmengsel betreffende de verdichting?
 - 1.2 Hoe vindt het verdichtingsproces in de huidige bouwpraktijk plaats?
 - 1.3 Hoe kan de afkoeling van een asfaltmengsel worden voorspeld en welke parameters zijn hierop van invloed?
 - 1.4 Hoe is de temperatuurverdeling binnen het asfaltmengsel tijdens het afkoelingsproces?

Het beoogde resultaat van deze onderzoeksvraag is het in beeld brengen van de materiaaleigenschappen van een asfaltmengsel, het verdichtingsproces te beschrijven en de afkoeling van een asfaltmengsel in beeld te brengen. De aanpak om antwoord te krijgen op deze onderzoeksvragen is het doen van literatuuronderzoek.

Onderzoeksvragen 2 en 3: Empirie

2. Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en de dichtheid?
 - 2.1 Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie onder laboratoriumomstandigheden?
 - 2.2 Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie in de praktijk?
 - 2.3 Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen onder laboratoriumomstandigheden?
 - 2.4 Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen in de praktijk?
 - 2.5 Hoe is de temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de praktijk?

Het beoogde resultaat van deze onderzoeksvraag is drieërlei; (1) onderzoeken of de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen haalbaar is, (2) onderzoeken wat het effect van verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en dichtheid is en (3) hoe de temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling van de asfaltlaag in de praktijk is. De aanpak om antwoord te krijgen op deze onderzoeksvragen is het doen van laboratoriumexperimenten en het doen van metingen in de praktijk. Voor wat betreft het behalen van de streefdichtheid en het effect op de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en dichtheid wordt dit onderzocht in het laboratorium en getoetst in de praktijk. Voor wat betreft temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag wordt dit gedaan aan de hand van het literatuuronderzoek en dit zal getoetst worden in de praktijkmeting.

Er zullen asfaltmengsels bij verschillende temperaturen worden verdicht en vervolgens wordt de dichtheid, verdichtingskracht en verdichtingsenergie bepaald. Wanneer er geen verschillen in de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en dichtheid te zien zijn bij de verschillende temperaturen maakt het qua dichtheid niet uit bij welke temperatuur er verdicht zal worden. Wanneer er wel verschillen zitten in de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en dichtheid bij de verschillende temperaturen is er duidelijk gemaakt bij welke temperaturen er welke effecten qua dichtheid zijn en dus binnen welk temperatuurvenster er idealiter verdicht dient te worden op basis van de dichtheid.

- 3 Wat zijn de negatieve mechanische consequenties bij het verdichten van verschillende verdichtingstemperaturen?
- 3.1 Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen onder laboratoriumomstandigheden?
- 3.2 Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen in de praktijk?

Het beoogde resultaat van deze onderzoeksvraag zijn de eventuele negatieve mechanische consequenties bij het verdichten buiten het ideale temperatuurvenster. De aanpak om antwoord te krijgen op deze onderzoeksvragen is het doen van laboratoriumexperimenten en dit te toetsen in de praktijk. Hierbij worden asfaltmengsels bij verschillende temperaturen verdicht en vervolgens wordt de mechanische kwaliteit bepaald. Wanneer er geen verschillen in deze eigenschappen te zien zijn bij de verschillende temperaturen maakt het voor de mechanische kwaliteit niet uit bij welke temperatuur er verdicht zal worden. Wanneer er wel verschillen zitten in de mechanische kwaliteit bij de verschillende temperaturen is er duidelijk gemaakt bij welke temperaturen er welke negatieve mechanische consequenties duidelijk worden en dus binnen welk temperatuurvenster er idealiter verdicht dient te worden op basis van de onderzochte mechanische eigenschappen.

Onderzoeksvraag 4: Analyse

- 4 Wat zijn het temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel?
- 4.1 Wat is het temperatuurvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?
- 4.2 Wat is het tijdsvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?

Het beoogde resultaat van deze onderzoeksvraag is het temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden. De aanpak om antwoord te krijgen op deze onderzoeksvragen is het analyseren van de data verkregen uit het empirisch onderzoek. Op basis van het empirisch onderzoek wordt het temperatuurvenster bepaald en op basis van een bestaand afkoelingsmodel (Pavecool) wordt het tijdsvenster bepaald.

Hoofdonderzoeksvraag: Doel

5 Volgens welke procedure kunnen temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels worden bepaald?

Het beoogde resultaat van deze onderzoeksvraag is een procedure voor het bepalen van temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Het proces voor de bepaling van het temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel vormt hierbij het uitgangspunt. Als er bij onderzoeksvraag 4 temperatuur- en tijdsvensters bepaald kunnen worden betekent dit dat er een werkbare procedure is om tijdsvensters te bepalen voor de Nederlandse asfaltmengsels. De aanpak om antwoord te krijgen op deze onderzoeksvraag is het trekken van conclusies uit de geanalyseerde data.

Deze onderzoeksvragen, het beoogde resultaat en de aanpak om dit resultaat te behalen zijn samengevat weergegeven in bijlage 1.2. In de volgende paragraaf zijn de onderzoeksstrategieën uiteengezet om de in deze paragraaf beschreven onderzoeksvragen te beantwoorden.

1.4 Onderzoeksstrategie

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvenster voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Zoals in het onderzoeksmodel beschreven wordt deze procedure ontwikkeld door empirisch onderzoek te doen op één Nederlands asfaltmengsel naar de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Op basis van het literatuuronderzoek moet duidelijk worden op welke parameters gelet moet worden tijdens dit empirisch onderzoek.

In deze paragraaf is de onderzoeksstrategie beschreven. Het doel van de onderzoeksstrategie is het uiteenzetten van de beslissingen over de wijze waarop het onderzoek uitgevoerd wordt (Verschuren en Doorewaard, 2007). Er is een literatuuronderzoek en een empirisch onderzoek uitgevoerd om de relevante informatie te vergaren en er is analyse op de resultaten uit deze onderzoeken uitgevoerd om op basis van de resultaten de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden. Deze onderzoeksstrategieën zijn achtereenvolgens beschreven.

1.4.1 Literatuuronderzoek

Om te onderzoeken welke parameters van invloed zijn op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces, en dus waarop gelet moet worden tijdens het empirisch onderzoek, is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Het literatuuronderzoek bestaat uit het selecteren van relevante literatuur, het bestuderen van de literatuur en het beschrijven van de belangrijkste conclusies uit de literatuur die gebruikt zullen worden in dit onderzoek.

Er zijn een drietal onderwerpen nader beschouwd; het asfalt en zijn mechanische eigenschappen, het verwerkingsproces van asfalt gericht op de dichtheid van het asfaltmengsel en de temperatuur tijdens verdichting van het asfaltmengsel. Er is met name gezocht op literatuur gericht op Nederlandse en Duitse asfaltmengsels, omdat de ontwikkelingen op het gebied van verdichten van asfalt hier gaande zijn en toepasbaar op de Nederlandse sector en daarmee passen binnen het onderzoekskader van AS-PARi. De keuze wanneer literatuur relevant is geacht voor dit onderzoek is arbitrair en ligt bij de onderzoeker. Op de literatuur is een inhoudsanalyse toegepast om ontsluiting van de juiste informatie ter beantwoording van de deelvragen te bewerkstelligen. De resultaten van de literatuurstudie zijn beschreven in hoofdstuk 2.

1.4.2 Empirisch onderzoek

Het doel van het empirisch onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Het empirisch onderzoek bestaat uit

het doen van laboratoriumexperimenten en het doen van metingen in de praktijk. Hierbij is de bron van informatie dus de werkelijkheid zelf. De ontsluiting van informatie wordt gedaan door het doen van proeven en het gebruik van meetinstrumenten. De proeven en meetinstrumenten, evenals de resultaten van het empirisch onderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 3.

Er is gekozen om empirisch onderzoek te doen naar een STAB 0/16 mengsel zonder PR(hergebruik), oftewel een AC 16 base 40/60. De redenen hiervoor zijn tweërlei, ten eerste omdat het een relatief makkelijk mengsel is om te bereiden en ten tweede omdat dit mengsel het meest onder kritische (temperatuurs)omstandigheden wordt gebruikt. Er is gekozen voor een laagdikte van 80 mm, zodat de mechanische proeven goed gedaan kunnen worden en zodat de laagdikte in relatie tot een maximale korrel van het asfaltmengsel goed is om een homogeen mengsel te verkrijgen (Head, 1980).

Het empirisch onderzoek draait om een drietal aspecten; de (verdichtings)temperatuur, het verdichten en de mechanische eigenschappen. Achtereenvolgens worden deze aspecten voor de laboratoriumexperimenten en de praktijkmeting beschouwd.

1.4.2.1 Experimenten

Op basis van de experimenten wordt beoogd een temperatuurvenster te kunnen bepalen waarbinnen idealiter verdicht dient te worden en wat de eventuele negatieve mechanische eigenschappen zijn bij het niet verdichten binnen dit ideale temperatuurvenster. Om dit te bereiken zullen STAB 0/16 mengsels (zonder PR) bij verschillende temperaturen verdicht worden, waarbij de dichtheidsprogressie en de mechanische eigenschappen bepaald worden.

De kenmerken van een experiment zijn (Verschuren en Doorewaard, 2007):

- Formering van minimaal 2 groepen, een groep met experimentele variabelen en een groep met afhankelijke variabelen;
- Willekeurige toedeling (randomisatie);
- De onderzoeker bepaalt welke groep aan interventie wordt blootgesteld;
- Zo min mogelijk invloeden van buitenaf;
- Nulmeting voor interventie.

In deze experimenten is de onafhankelijke variabele (experimentele variabele) de verdichtingstemperatuur en zijn de afhankelijke variabelen de verdichtingskracht, de verdichtingsenergie, de dichtheid, en de mechanische eigenschappen. De willekeurige toedeling wordt bij alle experimenten bereikt door het precies bereiden van het asfaltmengsel volgens de voorschriften. De onderzoeker zal bepalen welke interventies (veranderingen in temperatuur) toegepast zullen worden. Het uitsluiten van zoveel mogelijk invloeden van buitenaf wordt bij alle experimenten bereikt door het simuleren in het laboratorium. De nulmetingen zullen bestaan uit de temperaturen die nu in de voorschriften worden beschreven.

Om de werkelijkheid door middel van deze experimenten te beproeven en de juiste informatie te verkrijgen zijn voor dit onderzoek minimaal nodig:

1. Een proef om de verdichting te simuleren en de dichtheid te meten;
2. Meetinstrumenten om de temperatuur te meten;
3. Proeven om de mechanische kwaliteit van asfaltproefstukken te bepalen.

Als instrument om het asfalt te verdichten is gekozen voor de Freundl walssegmentverdichter (WSV-2008-KW50/500). Dit is een rollende verdichting en lijkt de beste methode om de verdichting uit de praktijk in het laboratorium te simuleren; Er vinden verticale en horizontale krachten plaats, er vindt een korreloriëntatie en een beoogde verdichting plaats (Mollenhauer, 2009). Met deze Freundl walssegmentverdichter is op een tweetal manieren verdicht. De eerste manier is een positiegestuurde verdichting, waarbij tot een beoogde laagdikte verdicht wordt. De tweede manier is een krachtgestuurde verdichting, waarbij met een vaste kracht verdicht wordt. De eerste manier toetst of de mechanische eigenschappen verschillen bij verschillende verdichtingstemperaturen en de tweede manier toetst of

het überhaupt mogelijk is om met een vaste kracht bij verschillende verdichtingstemperaturen tot de streefdichtheid te komen en ook welke mechanische consequenties dit heeft. De methode om de dichtheid te bepalen is op basis van onder- en boven water wegen.

Als instrument om de temperatuur te meten is gekozen voor thermokoppeldraden. Het meten van de temperatuur dient inzicht te geven in de homogeniteit van de temperatuur van het asfaltmengsel. Het doel hiervan is dus om duidelijk aan te kunnen geven bij welke temperatuur verdicht wordt en hoe groot de variabiliteit van de temperatuur, in verticale en horizontale richting, van het asfalt is. Beoogd wordt om de asfaltmengsels te verdichten bij temperaturen van 80°C, 100°C, 150°C en 170°C. De standaardtemperatuur uit de voorschriften is 150°C en is dus de nulmeting. De gedachte achter de keuze van deze temperaturen is dat bij 170°C een bovengrens gevonden zou kunnen worden, bij 80°C een zekere ondergrens bereikt is en bij 100°C wellicht ook nog negatieve mechanische consequenties te vinden zijn. Geprobeerd wordt om de mengsels op een zo constant mogelijke temperatuur te verdichten, en dus zo min mogelijk variabiliteit in de temperatuur van het mengsel te krijgen. Om deze variabiliteit zo klein mogelijk te houden worden ook de proefvorm en het walssectorsegment verwarmd (dit kan de Freundl plaatverdichter zelf). Het principe om de beoogde verdichtingstemperaturen te verkrijgen is door op een standaardtemperatuur te mengen (180 graden Celsius) en vervolgens de mengsels af te laten koelen tot de beoogde temperatuur.

De thermokoppels worden in de onderste centimeter van het asfalt, in het midden en in de bovenste centimeter van de asfaltlaag aangebracht om de verticale temperatuurverdeling van het mengsel in het laboratorium te meten. Het doel hiervan is om de temperatuur van het asfaltmengsel zo homogeen mogelijk te krijgen, om de temperatuur van het asfaltmengsel te kunnen simplificeren tot een gemiddelde mengseltemperatuur.

Om de mechanische eigenschappen te bepalen zijn er twee mechanische proeven op de mengsels uitgevoerd; een splijtproef (scheurgevoeligheid) en een triaxiaalproef (spoorvormings-gevoeligheid). Er is gekozen voor een splijt- en een triaxiaalproef om de mechanische eigenschappen te bepalen om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden voor onderlagen hiermee worden afgedekt (STAB), de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen.

De proefstukken worden geboord uit de asfaltplaten gemaakt met de Freundl walssegmentverdichter. Per plaat zullen 3 triaxiaalproeven worden gedaan en 6 splijtproeven. Proefstukken verdicht bij een temperatuur die slecht scoren op een van beide of beide mechanische proeven vallen dus buiten het temperatuurvenster en hebben dus negatieve mechanische consequenties.

Het aantal asfaltplaten per verdichtingstemperatuur hangt af van de spreiding en de beoogde betrouwbaarheid van de variabelen. Dit onderzoek beoogt een kleine spreiding bij de variabelen dichtheid, temperatuur en viscositeit, omdat dit belangrijke variabelen zijn die de kwaliteit van het mengsel sterk beïnvloeden. Om de spreiding van de variabelen te toetsen is gebruik gemaakt van statistiek. In de appendix (bijlage 2.4 (deel 1)) is berekend hoeveel asfaltplaten er per verdichtingstemperatuur gemaakt moeten worden. Hieruit is geconcludeerd dat er drie asfaltplaten per verdichtingstemperatuur gemaakt moeten worden.

1.4.2.2 Gevalsstudie

De gevalstudie zal een meting in de praktijk zijn om de resultaten van de experimenten uit het laboratorium te toetsen en daarmee geldig te maken.

De kenmerken van een gevalstudie zijn (Verschuren en Doorewaard, 2007):

- Een klein aantal onderzoekseenheden;
- Arbeidsintensieve benadering;

- Meer diepte, dan breedte;
- Selectieve steekproef;
- Kwalitatieve gegevens en onderzoeksmethoden;
- Open waarneming op locatie.

De gekozen praktijkmeting voldoet aan deze kenmerken. De onderzoekseenheden zijn de temperaturen (onder, midden en bovenkant) in de asfaltlaag, de dichtheidsprogressie en de mechanische eigenschappen van het asfalt.

Het is de vraag in hoeverre de verdichting in het laboratorium de verdichting in de praktijk simuleert om de conclusies uit het laboratorium geldig te maken in de praktijk. Één van de contradicties van laboratoriumonderzoek maakt deze stap lastig; Binnen laboratoriumonderzoek is er een wil om de werkelijkheid te simuleren, maar de werkelijkheid is continu veranderlijk, terwijl in het laboratorium zoveel mogelijk variabelen gelijk worden gehouden. Door het simplificeren van de werkelijkheid zal desalniettemin een verificatie van de laboratoriumresultaten door middel van een studie in de praktijk plaatsvinden. Om tijdsredenen is ervoor gekozen om niet alle variabelen te verifiëren, maar een deel hiervan. In dit onderzoek is ervoor gekozen om te verifiëren of het effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen als fenomeen ook in de praktijk voor komt. Er vindt dus geen verificatie plaats van aspecten als de precieze walskracht die uitgeoefend wordt, de vraag of de verschillende walsfasen (voorverdichting, hoofdverdichting en afwalsen) op een juiste wijze gesimuleerd worden, etc.

Het doel van deze praktijkcase is het toetsen van de resultaten uit het laboratorium, oftewel welke dichtheden en mechanische eigenschappen worden er in de praktijk bij de verschillende verdichtings-temperaturen bereikt.

De aanpak is om een aantal werkvakken aan te brengen en bij verschillende temperaturen te verdichten, waarbij per temperatuurgebied (werkvak) asfaltkernen geboord worden om inzicht te krijgen in de mechanische eigenschappen die bereikt zijn. Beoogd wordt om kernen te boren die de streefdichtheid gehaald hebben om het causale effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen te bepalen.

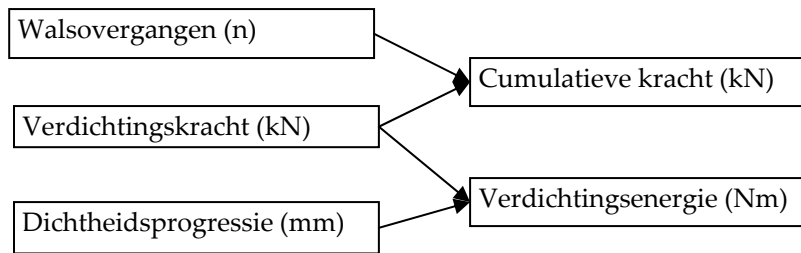
De te meten variabelen zijn de temperatuur tijdens het verdichtingsproces (op verschillende verticale hoogtes in het asfalt), de dichtheidsprogressie per walsovergang en de mechanische eigenschappen. De temperatuur zal in de bovenkant, het midden en de onderkant van de asfaltlaag worden gemeten met behulp van de thermokoppeldraden. De verdichtingsprogressie wordt gemeten door de dichtheid na elke walsovergang nucleair te meten met de Troxler (nucleaire dichtheidsmeting). De mechanische kwaliteit zal in het laboratorium, net als bij de experimenten, worden bepaald met een spijtproof en een triaxiaalproof.

1.4.3 Analyse

Het doel van de analyse is het bepalen van het temperatuur en tijdsvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) op basis van de resultaten uit het empirisch onderzoek. De analyse van de resultaten uit het empirisch onderzoek vindt plaats op de temperatuur van het asfaltmengsel, de verdichting en de mechanische eigenschappen. Achtereenvolgens zijn de criteria die geanalyseerd zijn, beschouwd. Een uitgebreide beschrijving van de proeven, meetinstrumenten en vergelijkingscriteria is in hoofdstuk 3 (het empirisch onderzoek) te vinden.

De vergelijkingscriteria met betrekking tot de temperatuur in dit onderzoek zijn (1) de variatie van de temperatuur binnen de asfaltlaag (boven, midden, onder), (2) de temperatuur die het proefstuk afkoelt tijdens de proef en (3) de tijd die het kost om van de verwerkingstemperatuur tot ongeveer 30 °C af te koelen.

De analyse van de verdichting vindt plaats op een vijftal variabelen; Het aantal walsovergangen, de maximale belasting, de dichtheidsprogressie, de cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie (figuur 1.5).



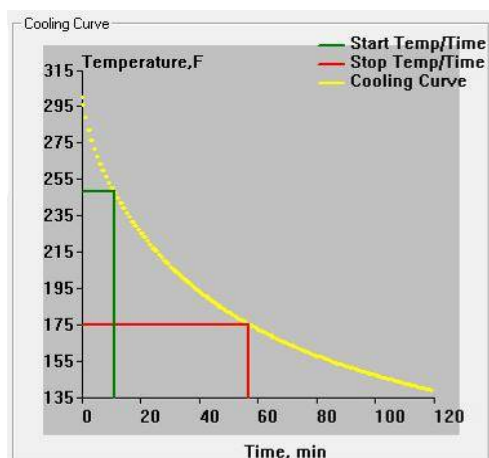
Figuur 1.5: Analyse resultaten verdichting

Bij de positie-gestuurde verdichting wordt de verdichtingsprogressie gestuurd en worden de andere variabelen met elkaar vergeleken. Bij de kracht-gestuurde verdichting wordt het aantal walsovergangen en de verdichtingskracht gestuurd (en dus ook de cumulatieve kracht) en dus vormen de verdichtingsprogressie en de verdichtingsenergie de vergelijkingscriteria. Bij de praktijkmeting vormen alle vijf variabelen de vergelijkingscriteria.

De vergelijkingscriteria bij de splijtproef zijn de splijtsterkte, de scheurtaaiheid (volgens NEN-EN 12697-23) en de relatieve maat voor de scheursnelheid (Rijkswaterstaat). Het vergelijkingscriterium om het effect van de verdichtingstemperatuur op de spoorvormingsgevoeligheid te bepalen is de cumulatieve rek, verkregen uit de zogeheten kruipcurve.

Het uitgangspunt bij het bepalen van het temperatuur- en tijdsvenster voor Nederlandse asfaltmengsels is als volgt; De verdichtingstemperaturen die de beoogde dichtheidsprogressie vertonen met als gevolg de beoogde mechanische eigenschappen vormen het temperatuurvenster. Bij de verdichtingstemperaturen buiten het temperatuurvenster is het mengsel te koud of te warm om het mengsel zoals beoogd te verdichten of treden er negatieve mechanische consequenties op. De bepaling van het temperatuurvenster vindt dus plaats op basis van de mechanische eigenschappen.

De stap van temperatuurvensters naar tijdsvensters zal gemaakt worden op basis van een bestaand afkoelingsmodel (Pavecool). Er is gekozen voor Pavecool (Chadborn et al, 1998), omdat het een geautomatiseerd model is, zodat het snel toepasbaar is en omdat het model gevalideerd is voor een aantal Nederlandse mengsels door Miller (2008) en daarbij goed bruikbaar geacht voor Nederlandse asfaltmengsels. In figuur 1.6 is een voorbeeld weergegeven van een afkoelingscurve met een bepaald tijds- en temperatuurvenster uit Pavecool. In de figuur is het temperatuurvenster om idealiter te verdichten tussen 250 graden Fahrenheit (120 °C) tot 175 graden Fahrenheit (80 °C) en het tijdsvenster is daarmee tussen de 10 minuten en 58 minuten na aanleg. Daarna is het niet meer mogelijk om dichtheidsprogressie te behalen, maar het is nog wel mogelijk om het asfalt vlak te walsen (tot ongeveer 60 °C).



Figuur 1.6: Voorbeeld afkoelingscurve Pavecool

Resumé; Het temperatuurvenster is gedefinieerd als die temperaturen waarbij de beoogde dichtheidsprogressie plaatsvindt en de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt. Het tijdsvenster is gedefinieerd als de tijd waarin de maximale temperatuur uit het temperatuurvenster afkoelt tot de minimale temperatuur uit het temperatuurvenster.

De hypothese is dat bij te hoge temperaturen relatief weinig verdichtingskracht en verdichtingsenergie nodig is om te verdichten tot de streefdichtheid, omdat de wals erin wegzakt en het mengsel zijn stabiliteit verliest en daarmee snel de streefdichtheid behaalt, maar dat het mengsel vet zal slaan. Vet slaan van het asfalt is het principe dat slappe mortel samen met de lucht het mengsel uitgedreven wordt i.p.v. dat de mortel aan het aggregaat hecht (Van Stek en Linden, 1992). De hypothese is dat bij te lage verdichtingstemperaturen relatief veel verdichtingskracht en verdichtingsenergie nodig is om de streefdichtheid te behalen en dat het misschien wel onmogelijk is om de streefdichtheid nog te behalen, omdat het mengsel minder viskeus is en daarmee mogelijk minder goed verwerkbaar. Voor wat betreft de mechanische eigenschappen is de hypothese dat bij te hoge temperaturen, door de grotere volumeverandering van bitumen dan van het aggregaat, het mengsel bovenin de constructie vet zal slaan en onderin de constructie een gebrekkige cohesie ontstaat, waardoor een slechte bitumen-aggregaat verhouding ontstaat en de hypothese is dat dit slechtere mechanische eigenschappen tot gevolg heeft. Bij te lage temperaturen is de hypothese dat schade op micro-niveau in het mengsel ontstaat en dat het mengsel dus minder goed verdicht is, waardoor slechtere mechanische eigenschappen worden behaald.

1.5 Afsluiting onderzoeksontwerp en leeswijzer voor het rapport

Asfalttechnologen zijn het erover eens dat de verdichting van een asfaltmengsel tijdens het verwerkingsproces de belangrijkste factor voor de prestaties van de asfaltlaag is (Decker, 2006; Ter Huerne, 2004, etc.). Door wegwerkzaamheden, de intrede van nieuwe mengsels en het asfalteren onder minder gunstige omstandigheden ligt de verdichting tijdens het asfaltverwerkingsproces onder druk. Het is daarom van belang om naar een methodegerichte manier van werken te streven, zodat ook onder minder gunstige omstandigheden zonder veel risico gewerkt kan worden en de asfaltondernemer zelflerend wordt. Binnen het verwerkingsproces lijkt de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt, belangrijk te zijn voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding. Het idee bestaat dat er een venster van temperaturen bestaat waarbinnen een ideale, beoogde verdichting plaatsvindt en afhankelijk van de snelheid van afkoelen dus ook een optimaal tijdsvenster. De temperaturen waarbij deze ideale, beoogde verdichting plaatsvindt, vormen de extremen van het temperatuurvenster waarbinnen idealiter verdicht dient te worden. Daarnaast is het van belang om de negatieve consequenties bij het niet verdichten binnen dit ideale temperatuurvenster te bepalen. Over het vinden van dit ideale temperatuurvenster en het bepalen van de negatieve consequenties wanneer niet verdicht wordt binnen dit ideale temperatuurvenster gaat dit onderzoek, waarbij de focus ligt op de mechanische eigenschappen van het asfaltmengsel.

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. De werking en merites van de procedure is aangetoond door het bepalen van het temperatuur- en tijdsvenster voor een STAB 0/16 mengsel (zonder PR). De aanpak om deze procedure te ontwikkelen is het doen van empirisch onderzoek in het laboratorium en het doen van een praktijkmeting. Het nut van dit onderzoek is het verbeteren van de kwaliteit van de wegverharding door het verbeteren van uitvoeringsprocessen op de weg door te verdichten op het juiste moment. Dit is van belang voor zowel opdrachtnemers, door de eindkwaliteit te kunnen verbeteren en zonodig op tijd bij te kunnen sturen, alsmede voor opdrachtgevers, door de juiste functionele eisen te kunnen stellen en mogelijke verborgen gebreken in een vroeg stadium te kunnen herkennen.

De opbouw van het rapport is als volgt; hoofdstuk 2 beschrijft de van belang zijnde theorie over asfalt, het verdichtingsproces en de temperatuur van het asfaltmengsel, waarna hoofdstuk 3 in gaat op het empirisch gedeelte van het onderzoek. Hoofdstuk 4 is de analyse van het temperatuur- en tijdsvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) en hoofdstuk 5 beschrijft de procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Hoofdstuk 6 beschrijft uiteindelijk de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van het onderzoek en geeft een aantal verbetervoorstellen voor de huidige bouwpraktijk. Hoofdstuk 7 beschrijft de belangrijkste consequenties voor de wegenbouwsector naar aanleiding van dit onderzoek.

Naast deze rapportage is er een aparte rapportage als appendix met het gehele literatuuronderzoek en de details uit het empirisch onderzoek als achtergrondmateriaal beschikbaar, zodat geen informatie verloren gaat.

2 Theorie over de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting

Het doel van het afstudeeronderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvenster voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Zoals in het onderzoeksmodel beschreven wordt deze procedure ontwikkeld door empirisch onderzoek te doen op één Nederlands asfaltmengsel naar de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Op basis van het literatuuronderzoek moet duidelijk worden op welke parameters gelet moet worden tijdens dit empirisch onderzoek. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste resultaten van dit literatuuronderzoek beschreven. Er zijn een drietal onderwerpen nader beschouwd; het asfalt en zijn mechanische eigenschappen, het verwerkingsproces van asfalt gericht op verdichting en de dichtheid van het asfaltmengsel en de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting. Deze drie onderwerpen zijn in de achtereenvolgende paragrafen nader beschouwd met een beantwoording van de onderzoeksvragen. Uiteindelijk is een conclusie van het literatuuronderzoek beschreven met een lijst met parameters die belangrijk zijn in het empirisch onderzoek. In de appendix naast dit rapport is het uitgebreide literatuuronderzoek met het volledige onderzoeksmateriaal terug te vinden.

2.1 Het asfaltmengsel

Deze paragraaf is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.1 en deze onderzoeksvraag is in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.1:

Wat is asfalt en welke materiaaleigenschappen heeft een asfaltmengsel betreffende de verdichting?

De uitwerking van deze onderzoeksvraag is opgedeeld in de volgende onderwerpen; (1) De bouwstoffen van het asfaltmengsel, (2) het gedrag van asfaltmengsels en (3) verschillende asfaltmengsels en de belangrijkste mechanische eigenschappen. Deze onderwerpen zijn achtereenvolgens beschouwd.

2.1.1 Bouwstoffen van het asfaltmengsel

Volgens Van der Velden (2003)¹ bestaat een asfaltmengsel over het algemeen uit steen, zand, vulstof, bindmiddel en evt. recyclingmateriaal (oud asfalt). Volgens VBW-asfalt (2000) kan een asfaltmengsel qua samenstelling worden onderverdeeld in twee delen; een deel van mineraal skelet en een deel voor de vulling van de holle ruimte in dat skelet. Het mineraal skelet kan worden opgebouwd uit grind, zand en/of steenslag en zorgt voor het dragend vermogen van het asfaltmengsel. De vulling wordt verzorgd door de mortel (bitumen + vulstof) of door mastiek (bitumen + vulstof + zand). Volgens Ter Huerne (2004) bestaat het asfaltmengsel uit vaste deeltjes, bitumen en poriën gevuld met lucht. De bitumen zorgen ervoor dat de minerale deeltjes aan elkaar worden gebonden.

Een niet meer weg te denken bouwstof is het asfaltgranulaat. Asfaltgranulaat is oud asfalt dat onder andere geschikt is om te worden opgewerkt, gecombineerd met nieuw materiaal, tot nieuw warm asfalt. Asfaltgranulaat komt vrij bij het frezen van oude asfaltverhardingen of wordt verkregen door het breken van schollen oud asfalt.

¹ Het boek "Wegenbouw" van Van der Velden (2003) is een praktisch handboek en geen wetenschappelijke literatuur. Maar het is wel praktisch relevant, omdat het in veel opleidingen gebruikt wordt.

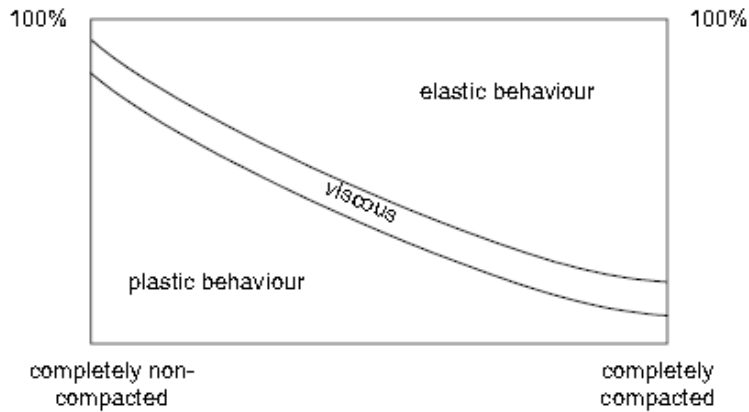
Daarnaast is voor de verwerking van het asfaltmengsel een bepaalde viscositeit nodig, welke afhangt van de bitumen en de temperatuur daarvan. Hardere bitumen moeten meer verwarmd worden om dezelfde viscositeit te verkrijgen dan zachtere bitumen. Een bepaalde viscositeit kan worden bereikt door het verwarmen van bitumen, het versnijden het bitumen met een verdunningsmateriaal of door het emulgeren van bitumen in water. De viscositeit van de bitumen is een eigenschap die van wezenlijk belang is voor het mengselgedrag tijdens de verwerking en in een later stadium voor het gedrag van de gereede asfaltverharding (VBW-asfalt, 2000). Mengsels met relatief weinig bitumen hebben in het algemeen een relatief hoge weerstand tegen blijvende vervorming. Omgekeerd is relatief weinig bitumen vaak aanzet tot optreden van materiaalverlies ten gevolge van onvoldoende cohesie van de mortel. Uiteindelijk zal een voortgaande degeneratie van het wegdek hiervan het gevolg zijn (gaten). Ook de vermoeiingseigenschappen van de asfaltmengsels worden minder; er zal eerder scheurvorming optreden. Naarmate de viscositeit lager wordt (relatief meer bitumen) neemt de mengselstijfheid af (VBW-asfalt, 2000). Bitumen kan afhankelijk van de bereidingswijze dik, vloeibaar tot vast zijn. Bij hoge temperaturen is bitumen een vloeistof, bij lage temperaturen is het hard en bros. Bitumen is daarmee een thermoplastisch materiaal. Bitumen hebben een goed hechtvermogen en is mede hierdoor een uitstekend wegebouw materiaal. Het gedrag onder belasting is zowel viskeus als elastisch en wordt sterk beïnvloed door de temperatuur en de duur van de belasting (VBW-asfalt, 2000). Verder is de vulstof van belang voor het asfaltmengsel. Onder vulstof wordt in principe verstaan het mineraal aggregaat kleiner dan 63 μm . Vulstoffen worden naar hun viscositeitsbeïnvloedend effect ingedeeld in de soorten zeer zwak, zwak en middelsoort. Deze vulstofsterkte (opneemvermogen van bitumen) is een vulstofeigenschap die bepaald wordt door de korrelgrootte en de aard van het korreloppervlak van de vulstofkorrels (NEVUL, 2006). Zwakke vulstof wordt het meest gebruikt en wordt toegepast in STAB, GAB, OAB, DAB en in SMA. Middelsoort mag in OAB en DAB worden toegepast indien bepaalde mengseleigenschappen dit wenselijk maken. In ZOAB is middelsoort vulstof met hydroxide zelfs voorgeschreven, t.b.v. de weerstand tegen stripping (NEVUL, 2006).

2.1.2 Gedrag van asfaltmengsels

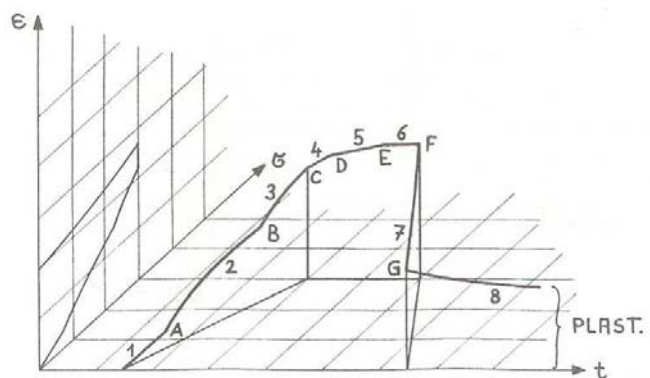
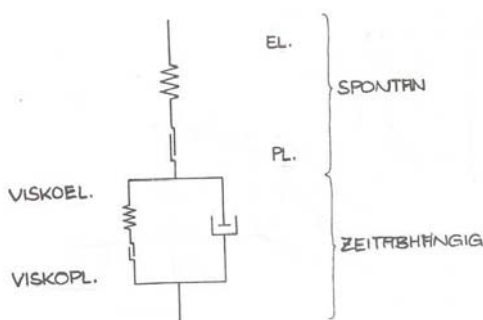
Volgens het tweede axioma van de rheologie is elk materiaal elastisch (model van Hooke), viskeus (model van Newton) en plastisch (model van St. Venant). Voor de onafhankelijke materialen van het asfaltmengsel geldt; het mineraal skelet gedraagt zich overwegend elastisch-plastisch en de bitumen gedragen zich overwegend viskeus en elastisch (tijdens verdichting).

Figge (1987) heeft onderzoek gedaan naar de rheologische eigenschappen van het asfaltmengsel en concludeert dat het gedrag van het asfaltmengsel aan het begin van de verdichting met name plastisch-viskeus is, tijdens de verdichting verandert dit gedrag in overwegend elastisch-viskeus gedrag, waarbij de mate van viskeus gedrag tijdens de gehele verdichting nagenoeg gelijk blijft (figuur 2.1). Volgens VBW-asfalt (2000) is het gedrag afhankelijk van de tijd waarin de belasting aanwezig is; bij een korte belastingstijd overheerst elastisch gedrag, bij een lange belastingstijd overheerst het viskeuze gedrag (VBW-asfalt, 2000). Het materiaalgedrag van asfalt tijdens verdichting kan volgens Ter Huerne (2004) worden gekarakteriseerd als elastisch (totdat de korrels gaan schuiven) en plastisch (tijdens het schuiven).

Voor het gedrag van asfaltmengsels tijdens verdichting heeft Krass (1971) een 5-parametermodel ontwikkeld (zie figuur 2.2). Wetenschappelijk gezien (mathematisch) kan dit model de verdichting niet precies beschrijven, maar het beschrijft wel goed de rheologische fasen die het asfaltmengsel tijdens verdichting ondergaat (Krass, 1971).



Figuur 2.1: Rheologische fasen asfaltverdichting (Figge, 1987)



Figuur 2.2: 5-parametermodel Krass (1971)

Het model om de verdichting van het asfaltmengsel te voorspellen, begint lineair en/of degressief (bij een progressieve vering) bij een toenemende belasting (lijn 1). Al vrij snel wordt punt A bereikt, welke als spontaan-elastisch kan worden beschreven. Bij lijn 2 ontstaat er wrijving en begint het materiaal ook visco-elastisch te worden. Bij punt B vinden vrijwel alleen visco-plastische gedragingen plaats. Wanneer de kracht gelijk gehouden wordt (tussen punt C en F) vindt een verdere vervorming plaats. Op lijn 4 vindt met name visco-plastisch gedrag plaats, op lijn 5 met name spontaan-plastisch gedrag en op lijn 6 met name visco-elastisch gedrag. Na het wegnemen van de belasting (punt G) vindt een visco-elastische vervorming plaats (voor een oneindige tijd). Er blijft een materiaal over met spontaan-plastisch en visco-plastisch gedrag.

Zoals alle materialen heeft het asfaltmengsel kenmerken van elastisch, plastisch en viskeus gedrag. Afhankelijk van het moment tijdens verdichting kunnen bepaalde gedragingen overheersen. In dit afstudeeronderzoek is gefocust op het verdichtingsproces met de walsen, dus na voorverdichting met de balk en in deze fase is het asfaltmengsel al grotendeels verdicht. Het asfaltmengsel is daarom met name beschouwd als een mengsel met visco-elastisch gedrag. In het empirisch onderzoek dient er dus rekening mee gehouden te worden dat het asfaltmengsel visco-elastisch gedrag vertoont en dat er een elastisch effect plaats kan vinden na het verdichten, zonder dat deze direct geregistreerd wordt.

2.1.3 Soorten asfaltmengsels

Er bestaan verschillende asfaltmengsels om te voldoen aan verschillende eisen voortvloeiende uit vervormings- scheurvormings- en duurzaamheidsoverwegingen. Molenaar en Houben (2003) geven aan dat de onderkant van de asfaltverharding grote horizontale spanningen op moet kunnen vangen en vooral op vermoeiing wordt belast, in het midden van de asfaltverharding grote deviatorspanning

gen kunnen ontstaan en dus vooral weerstand tegen permanente deformatie moet hebben, hetgeen ook geldt voor de bovenkant van de asfaltverharding. Verder dient de bovenkant van de verharding een bepaalde duurzaamheid en stroefheid te bezitten. Wegens deze verschillende spanningen en eisen zijn er verschillende asfalmengsels ontwikkeld.

De meest bekende, en inmiddels klassieke, mengsels zijn:

- Dichtasfaltbeton (DAB);
- Open asfaltbeton (OAB);
- Steenslagasfaltbeton (STAB);
- Zeer open asfaltbeton (ZOAB);
- Steenmastiakasfalt (SMA).

DAB bestaat voornamelijk uit gebroken materiaal (wegens spoorvormingsweerstand en stroefheid) met relatief weinig holle ruimte en een hoog bitumengehalte (volgens het betonprincipe). OAB bestaat ook uit gebroken materiaal en heeft een lager bitumengehalte dan DAB. Ook STAB bestaat uit gebroken materiaal en een relatief laag bitumengehalte. ZOAB is een discontinu gegradeerd mengsel met een kleine zandfractie, een laag bitumengehalte en veel holle ruimte. ZOAB heeft een goede weerstand tegen permanente deformatie. SMA heeft een hoog bitumengehalte en veel klein aggregaat. Daarmee heeft SMA een relatief hoge weerstand tegen vermoeiing.

In dit onderzoek is de voorkeur uitgegaan naar dichte mengsels, omdat deze relatief het makkelijkst te onderzoeken zijn (i.v.m. holle ruimte) en relatief weinig variabiliteit vertonen. In dit onderzoek is er voor gekozen om onderzoek te doen naar een STAB 0/16 mengsel, omdat dit mengsel veel gebruikt wordt en omdat dit het meest aangelegd wordt onder kritische (minder ideale) omstandigheden. Dit mengsel zal zonder regeneratieasfalt (PR) worden gemaakt om een grote variabiliteit in de mengsels te voorkomen. Omdat de viscositeit van het asfalmengsel erg belangrijk is voor de prestaties van het asfalmengsel is in dit onderzoek ook de herhaalbaarheid van de viscositeit van de bitumen worden onderzocht door een penetratieproef en een ring&kogelproef. In het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) is gebruik gemaakt van Wigras 40K, hetgeen een zwakke vulstof is, en bitumen 40/60, een relatief harde bitumensoort.

Om te voldoen aan eisen voortvloeiende uit vervormings- scheurvormings- en duurzaamheidsoverwegingen dienen asfalmengsels bepaalde mechanische eigenschappen te hebben, zoals weerstand tegen scheurgroei, weerstand tegen vermoeiing, weerstand tegen viskeuze vervorming, stijfheid, etc. VBW-asfalt (2005) geeft een veelheid aan schadebeelden, zoals rafeling, vetslaan, onvlakheid, scheuren, gaten etc., maar hiervan zijn bij de dimensionering van een STAB 0/16 mengsel over het algemeen maar een tweetal kritisch en dat zijn de permanente vervorming (spoorvorming) en scheurvorming (vermoeiing).

Een belangrijk schadebeeld is permanente vervorming van de lagen die zich in de rijsporen uitten als spoorvorming. Deze spoorvorming is het gevolg van visco-plastische deformatie van de asfaltlagen en plastische deformatie van de ongebonden fundering en ondergrond. Het is dus van belang om het spanningsniveau in alle lagen voldoende laag te houden om permanente vervorming te voorkomen en dus voldoende weerstand tegen permanente vormverandering te hebben. Als ontwerpcriterium wordt veelal gekozen dat wanneer de elastische deformatie aan de bovenkant van de ondergrond beneden een bepaald niveau blijft ook de permanente vormverandering beperkt zal blijven (Molenaar en Houben, 2003).

Scheurvorming en vermoeiing zijn nauw verwante fenomenen. Vermoeiing houdt in het ontstaan van scheurvorming als gevolg van herhaald optredende belastingen. De vermoeiingsweerstand wordt positief beïnvloed door een toenemend bitumengehalte, een afnemende holle ruimte en een goede hechting tussen de korrels en de mortel. Het schadebeeld scheurvorming kan grotendeels in drie categorieën worden opgedeeld; craquelé, langsscheuren en krimpsscheuren (Molenaar en Houben, 2003).

Er zijn verschillende proeven om de mechanische kwaliteit van asfaltproefstukken in het laboratorium te bepalen. Volgens VBW-asfalt (2001) kunnen de scheurgevoeligheid (spleetproef), vermoeiing (vierpuntsbuigproef), viskeuze vervorming (triaxiaalproef), stijfheid (vierpuntsbuigproef) en de treksterkte, scheurgroei (SCB-test) door functionele proeven bepaald worden (VBW-asfalt, 2001).

In dit onderzoek is gekozen om de mechanische eigenschappen te bepalen met een spleet- en een triaxiaalproef (figuren 2.3 en 2.4) om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden voor onderlagen hiermee worden afgedekt (STAB), de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen.

Recansens et al (2000) hebben onderzoek gedaan naar kwaliteitscriteria voor het eindproduct (asfaltweg) gebaseerd op de mechanische eigenschappen. Recansens et al (2000) geven aan dat de indirecte treksterkte een efficiëntere parameter is om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten. In dit onderzoek zal getoetst worden of dit ook voor Nederlandse asfaltmengsels geldt.



Figuur 2.3: Triaxiale drukproef



Figuur 2.4: Spleetproef

2.2 Het verdichtingsproces

Deze paragraaf is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.2 en deze onderzoeksvraag is in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.2:

Hoe vindt het verdichtingsproces in de huidige bouwpraktijk plaats?

De uitwerking van deze onderzoeksvraag is opgedeeld in de volgende onderwerpen; (1) de dichtheid, (2) het verwerkings- en verdichtingsproces, (3) fasen van verdichting en (4) verdichtingsmethoden in het laboratorium. Deze onderwerpen zijn achtereenvolgens beschouwd.

2.2.1 Dichtheid van het asfaltmengsel

Ter Huerne (2004) geeft meerdere definities voor de dichtheid aan; het volumepercentage holle ruimte gerelateerd aan het volume van het totale materiaal, hoeveel massa in een bepaald volume aanwezig is, de hoeveelheid 'ruimte' in het mineraalskelet, het totale volume van de holle ruimte in het steenskelet plus het volume van de vloeistof in het materiaal gerelateerd aan het volume van het materiaal. Ter Huerne (2004) gebruikt 'de hoeveelheid ruimte in het mineraalskelet gerelateerd aan het volume van het materiaal', omdat deze definitie de korrel dichtheid goed benadert en niet afhankelijk is van het bitumenpercentage of percentage holle ruimte. Van der Velden (2003) definieert de dichtheid als

de mate waarin de korrels in elkaar passen. Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen, de vochtigheidsgraad en de kracht die uitgeoefend wordt op de korrels.

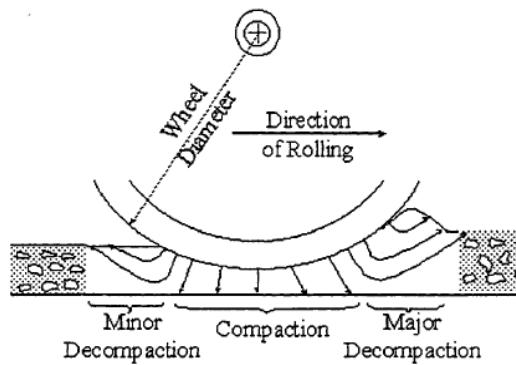
Om het asfalt belastingen succesvol te kunnen laten dragen met weinig deformatie als gevolg is het nodig om de deeltjes van het materiaal nader tot elkaar te brengen. Om dit te bereiken is het nodig om te korrels te rangschikken en lucht uit te drijven. Dit proces is bekend als verdichting (Ter Huerne, 2004). Het verdichten van asfalt vindt plaats door het asfaltmengsel te belasten. Een materiaal dat belast wordt wil in principe in alle richtingen vervormen. De vervorming wordt tegengegaan door de tegendruk en de inwendige samenhang (Van Stek en Linden, 1992). Om een goede dichtheid te bereiken moet het steenskelet dus verder in elkaar worden gedrukt. Dit kan alleen worden bereikt (zonder dat er ontmenging ontstaat) als de overtollige lucht uit het mengsel wordt gedreven (Van Stek en Linden, 1992). Door een initieel relatief onverdicht materiaal te belasten verandert de korrelrangschikking (de dichtheid van het deeltjesskelet) en hierdoor wordt de lucht uitgedreven. Het specifieke volume van het materiaal verandert en de dichtheid van het materiaal neemt toe. De vloeistof in het mengsel "smeert" de contactvlakken tussen de korrels en maakt het schuiven van de korrels ten opzichte van elkaar lichter (Ter Huerne, 2004). Als het asfaltmengsel teveel verdicht wordt, is er geen of te weinig holle ruimte (lucht) aanwezig, waardoor het asfalt overvuld raakt en daarmee kan het asfaltmengsel in bepaalde situaties zijn stabiliteit verliezen (Van Stek en Linden, 1992).

Volgens Van Stek en Linden (1992) zijn bij steenrijke mengsels vaak ook horizontale krachten nodig om de gewenste korrelrangschikking te bereiken. Deze horizontale spanningen ontstaan door het verticaal belasten van het materiaal, waardoor het materiaal horizontaal wil vervormen. Door verschillen in horizontale (opsluit)spanningen en verticale spanningen ontstaan schuifspanningen. Door variatie in de schuifspanning ten opzichte van de verticale belasting ontstaat een knedende werking van het asfaltmengsel. Bij onvoldoende opsluiting van het asfalt, kan dit door de wals worden verplaatst, met het uitwalsen van het asfalt als gevolg (Van Stek en Linden, 1992).

2.2.2 Verwerkings- en verdichtingsproces van asfalt

Het asfaltverwerkingsproces kan volgens Ter Huerne (2006) worden opgedeeld in (1) het maken en verwerken van het asfalt bij de asfaltcentrale, (2) de logistiek richting de bouwplaats, (3) het plaatsen van het asfalt uit de asfaltvrachtwagen in de hopper van de verwerkingsmachine, (4) de verwerking van het asfaltmengsel tot een asfaltlaag en (5) de verdichting van het asfalt. In dit onderzoek wordt alleen de laatste fase beschouwd, de verdichting met de wals, waarbij de focus ligt op de bulk van de verdichting met de wals en dus niet op de voorverdichting met de balk van de spreidmachine.

Kari (1967) beschrijft het verdichtingsproces als een dynamisch proces onder een bewegende rol (zie figuur 2.5). De walsrol zakt ver genoeg het asfalt in zodat het contactvlak van de wals groot genoeg is om de draagkracht van het asfalt te vergroten. De voortbewegende kracht veroorzaakt schuifbewegingen met een zone van kleine decompactie achter de walsrol en een grote zone van decompactie voor de walsrol en verdichting direct onder de walsrol (Chadborn et al., 1998). Idealiter moet de viscositeit van het bindmiddel groot genoeg zijn om de decompactie van de wals te weerstaan, maar kleiner dan een understressed (te kleine kracht om de dichtheid te vergroten) asfaltmengsel (Chadborn et al., 1998).



Figuur 2.5: Verdichting als dynamisch proces (Kari, 1967)

Van Stek en Linden (1992) geven aan dat de dichtheid van het asfalt toeneemt met de toename van het aantal walsovergangen. Het effect van elke walsovergang zal telkens anders zijn, omdat de asfalteigenschappen (o.a. de stijfheid van het mengsel door afkoeling) veranderen in de loop van het verdichtingsproces. Als een wals gaat rijden ontstaat een ander beeld; het asfalt achter de wals is meer verdicht dan het asfalt voor de rol, waarvoor de wals altijd tegen een heuveltje oprijdt. Hierdoor neemt de horizontale druk toe, waardoor het asfalt eerder horizontaal zal vervormen. De grootte van deze vervorming hangt af van de snelheid van de wals. Bij een lage snelheid kunnen de vervormingskrachten beter worden opgenomen, waardoor de ingebrachte energie gebruikt wordt voor het verdichten van het asfalt. In de fase waarin het asfalt zich elastisch gedraagt, kunnen de horizontale drukken leiden tot aanzienlijke verplaatsingen van het asfalt (schuiven en scheuren), omdat niet alle energie gebruikt kan worden om te verdichten.

Van der Velden (2003) geeft 4 belangrijke aspecten waar de verdichting tijdens het verdichtingsproces vanaf hangt; de eigenschappen van de onderlaag, de samenstelling van het asfaltmengsel, het type wals en de temperatuur tijdens de verdichting. Om het causale effect van de verdichtingstemperatuur op de dichtheid en de mechanische eigenschappen te onderzoeken dienen deze aandachtspunten in dit onderzoek dus zo gelijk mogelijk, in het laboratorium en in de praktijkmeting, te worden gehouden.

Ook Van Dee (1999) heeft onderzoek gedaan naar de van invloed zijnde parameters op de verdichting van asfalt. Hierin wordt geconcludeerd dat de mengselsamenstelling, de laagdikte, het walstype, het aantal walsovergangen en de temperatuur van de asfaltaag van belang zijn.

Volgens VBW-asfalt (2000) zijn minstens vier factoren van invloed op de verdichtbaarheid van het mengsel; de mortelsamenstelling, de laagdikte, de viscositeit en het gebruik van brekerzand.

De mortelsamenstelling bepaalt de inwendige kleefkracht en daarmee de inwendige samenhang van het mengsel. Grotere korrels neigen tot afrollen en bemoeilijken daarmee een homogene spreiding. Daarnaast laten grotere korrels in een bepaalde laagdikte zich moeilijker verdichten dan kleinere stenen in dezelfde laagdikte. Maar door een geringe laagdikte koelt het asfalt relatief snel af, waardoor de verdichtbaarheid afneemt. Een relatief grote korrel is dus gunstig voor de stabiliteit van de laag, maar benadeelt de spreidbaarheid en verdichtbaarheid.

Om de effectiviteit van het walsen te kunnen vergelijken zijn verschillende walsrolkarakteristieken ontwikkeld. In dit afstudeerproject zijn er hiervan twee beschouwd, van Nijboer (1948) en van VBW-asfalt (2000). De walsrolkarakteristiek van Nijboer (1948) kan bepaald worden volgens formule 2.1 en de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt (2000) kan bepaald worden volgens formule 2.2. De walsrolkarakteristiek van Nijboer is fundamenteel onderbouwd en die van VBW-asfalt is meer gebaseerd op ervaringen uit de praktijk. Over de bruikbaarheid van de walsrolkarakteristiek is een discussie gaande.

In het vervolg van dit afstudeerverslag wordt, om de impact van walsen te bepalen, gebruik gemaakt van de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt, omdat deze bij vakmensen in de praktijk het meest be-

kend is. Volgens VBW-asfalt (2000) (formule 2.2) moet de walskarakteristiek (W) tussen 16 en 23 liggen; als de walsrolkarakteristiek kleiner is dan 16 krijgt de walsrol een strijkend effect en als deze hoger is dan 23 krijgt de walsrol een knijpend effect.

$$W = \frac{P}{l \cdot D} \quad \text{F2.1}$$

Waarbij:

W = walsrolkarakteristiek

P = Belasting op de rol (kN)

l = Rolbreedte (m)

D = Roldiameter (m)

$$W = \frac{P}{l \cdot D^2} \quad \text{F2.2}$$

Waarbij:

W = walsrolkarakteristiek

P = Belasting op de rol (kN)

l = Rolbreedte (m)

D = Roldiameter (m)

2.2.3 Fasen van verdichting

Van Stek en Linden (1992) constateren dat er bij het verdichten van dichte asfaltmengsels (DAB, GAB, STAB) in de praktijk 3 fasen in het verdichtingsproces kunnen worden onderscheiden:

- Fase 1: In deze fase moet de korrelrangschikking plaatsvinden. De stenen moeten langs elkaar kunnen glijden en dus moet de mortel nog voldoende flexibel, en dus warm, genoeg zijn. Als er stuwdruk ontstaat kan er lucht worden uitgedreven. De temperatuur van het asfalt achter de balk bepaalt de maximaal toelaatbare trekspanning. Als de wals verdicht vormt het oplegoppervlak zich voor de walsrollen, zonder grote horizontale verplaatsing. De mortel moet hierbij niet te stug worden. Voordat het asfalt tot 120 graden Celsius is afgekoeld, moet het korrelskelet zijn gerangschikt.
- Fase 2: In fase 2 gaat het asfalt zich anders gedragen. Door toenemende dichtheid en het toenemen van de mortelstijfheid bij een dalende temperatuur raakt de nog in het asfalt aanwezige lucht ingesloten, waardoor het asfalt zich zuiver elastisch gaat gedragen en dus is het verdichtingseffect verwaarloosbaar. Deze elastische fase is bij de gebruikelijke asfaltmengsel sterk temperatuurafhankelijk (90-120 graden Celsius). In deze fase mag de horizontale druk op het asfalt niet te hoog oplopen, omdat de kans op schuiven en scheuren groot is. Dit kan worden bereikt door onder een walskarakteristiek van 20 te blijven.
- Fase 3: In fase 3 (80 a 90 graden Celsius) kan de verdichting van het asfalt weer worden voortgezet door de verder toenemende stijfheid van de mortel en het afnemende volume van bitumen en lucht (krimp). Door deze krimp moet het korrelskelet nog verder samengedrukt worden. Door de relatief hoge mortelstijfheid en hoge mengseldichtheid is hiervoor een grote verticale druk nodig.

Als er alleen nog verdicht dient te worden, en dus geen korrelrangschikking meer hoeft plaats te vinden, moet de walskarakteristiek tussen de 20 en 23 liggen en wanneer nog walssporen weggewalst moeten worden, en dus asfalt nog verplaatst moet worden, dient de walskarakteristiek boven de 23 te liggen.

Bouwbedrijf Ooms heeft ook onderzoek gedaan naar de verschillende fasen binnen het verdichtingsproces, met name gericht op polymeer gemodificeerd asfalt. Hierin wordt ook geconcludeerd dat het verdichtingsproces uit drie fasen bestaat; een fase tussen 170 en 120 graden Celsius met gebruik van

een drierolwals, een fase tussen 120 en 90 graden Celsius met gebruik van een tandemwals en een fase tussen 90 en 60 graden Celsius met weer gebruik van een drierolwals. Deze fasen zijn weergegeven in appendix 3.1.

Ter Huerne et al (2008) hebben onderzoek gedaan naar mogelijkheden van 3D simulaties om het verdichtingsproces te simuleren. Volgens Ter Huerne (2004) is de verdichtingstoename te omschrijven als een soort middelingsproces en vindt het plaats in drie stappen. Het materiaal ondergaat in het verdichtingsproces dus een drietal fasen. Tijdens de eerste verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats waar de spanningen op het materiaal het hoogst zijn (boven in de laag). Bij de tweede verdichtingsfase vindt de meeste verdichtingstoename plaats waar het materiaal het zachtst is (onder in de laag). Tijdens de derde verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats daar waar de druk relatief hoog in combinatie met waar het materiaal nog relatief zacht is (midden van de laag).

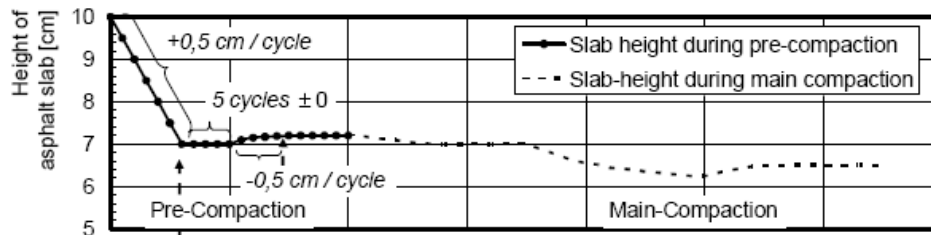
In dit onderzoek zal het verdichtingsproces als geheel worden beschouwd en geen onderzoek worden gedaan naar de fasen onderling, omdat dit onderzoek zich richt op het causale effect tussen verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen van het asfaltmengsel.

2.2.4 Verdichtingsmethoden in het laboratorium

Voor een simulering van de verdichting in het laboratorium zijn in de Europese standaarden (EN-12697) een viertal verdichtingsmethoden beschreven; impact verdichting, knedende verdichting, vibrerende verdichting en rollende verdichting. Uit een vergelijking (weergegeven in de appendix naast dit afstudeerrapport) blijkt dat de rollende verdichting de beste overeenkomst met de werkelijkheid heeft en ook de mogelijkheid om het proefinstrument voor te verwarmen, zodat goed een homogene temperatuur van het asfaltmengsel kan worden verkregen. Ook is het proefstuk bij de rollende verdichting vrij groot, waardoor de opsluiting van het midden van het asfaltproefstuk in hoge mate met de werkelijkheid overeenkomt. Daarom is gekozen om een rollende verdichting in dit onderzoek toe te passen. Binnen de rollende verdichting zijn er verschillende methoden mogelijk; verdichten met een pneumatisch wiel, verdichten met een walssegment en verdichten met glijdende platen (EN-12697-33). Het argument waarop de keuze tussen deze verdichtingsmethoden binnen de rollende verdichting is gemaakt is een praktische, omdat alleen de walssegmentverdichter beschikbaar is binnen Ooms. De walssegmentverdichter die in dit onderzoek is toegepast is de Freundl plaatverdichter (WSV-2008-KW50/500).

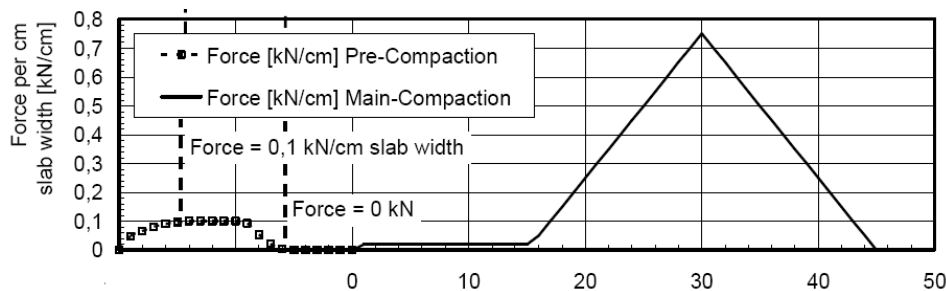
Mollenhauer (2009) heeft voor de verdichting met deze walssegmentverdichter een tweetal standaard verdichtingsprocedures opgesteld voor de Duitse asfaltmengsels; één gebaseerd op een kracht gestuurde verdichting (figuur 2.7) en één gebaseerd op een positie gestuurde verdichting (figuur 2.6). Mollenhauer (2009) beveelt de positie-gestuurde verdichting aan om de verdichting van de spreidmachine door middel van de balk te simuleren en beveelt de kracht-gestuurde verdichting aan om de verdichting door middel van de walsen te simuleren. Hierbij is ook het doel geweest om de verdichting in de praktijk zo goed mogelijk te simuleren, oftewel de voorverdichting van de spreidmachine en de hoofdverdichting met de walsen. Deze procedures vormen het uitgangspunt voor de verdichting in dit onderzoek.

De procedure voor de positie gestuurde verdichting gaat als volgt: 1. Verdicht met 0,5 mm per wals-overgang tot 0,1 kN per centimeter materiaal, 2. Houdt de hoogte (laagdikte) constant voor 5 wals-overgangen, 3. Ontlast de kracht met 0,5 mm. per wals-overgang tot 0 kN (figuur 2.6).



Figuur 2.6: Positie gestuurde verdichting (Mollenhauer, 2009)

De procedure voor de kracht gestuurde verdichting gaat als volgt: 1. Verdicht 15 walsovergangen met 0,02 kN per cm. materiaal, 2. Verhoog in 15 walsovergangen constant de kracht tot 0,75 kN per cm. materiaal, 3. Ontlast de kracht in 15 walsovergangen tot 0 kN (figuur 2.7).



Figuur 2.7: Kracht gestuurde verdichting (Mollenhauer, 2009)

2.3 De temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting

Deze paragraaf is geschreven aan de hand van de onderzoeksvragen 1.3 en 1.4 en deze onderzoeksvragen zijn in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.3:

Hoe kan de afkoeling van een asfaltmengsel worden voorspeld en welke parameters zijn hierop van invloed?

Chadbourn et al (1998) geven aan als belangrijke parameters waarmee rekening gehouden dient te worden bij de temperatuur van het asfaltmengsel; de temperatuur bij de asfaltcentrale, het verwerkingsproces, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte, de dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid en zonnearmte).

Bossemeyer (1986) heeft ook onderzoek gedaan naar de modellering van de afkoeling van het asfaltmengsel. Hierbij is aangegeven dat de afkoeling van het asfaltmengsel afhangt van de temperatuur tijdens aanbrenge, de laagdikte, de windsnelheid, neerslag, de buitentemperatuur en de temperatuur van de ondergrond. Volgens Van der Velden (2003) is het gunstige temperatuurgebied afhankelijk van de mengselsamenstelling, de dikte van de laag, het soort bindmiddel, type en werkwijze van de spreidmachine, het walsgewicht, de buitentemperatuur en de windkracht. In het kader van de temperatuur- en tijdsvensters van Chadbourn et al (1998) geeft Van der Velden (2003) aan dat de temperatuur nooit onder de 70 graden Celsius mag komen voordat de eerste wals op het asfalt gaat. De juiste temperatuur voor de verwerking is afhankelijk van het type mengsel. Mengsels met een hoog bitumengehalte (bv. SMA) en harde bitumen moeten in principe bij een hoge temperatuur worden verwerkt, omdat de bitumen warm moeten blijven om te verwerken en mengsels met een laag bitumengehalte en zachte bitumen kunnen met een lagere temperatuur worden verwerkt. Bij een te lage temperatuur kunnen de bitumen niet goed meer 'smeren' met een niet-gesloten oppervlak als gevolg, dat snel kan worden beschadigd of vervormd door de verkeerslast. Bij een te hoge temperatuur ontstaat er opstuwning van het asfaltmengsel naast de walsrol, ontstaan er dwarsscheurtjes in de asfaltlaag achter de wals, kleeft het mengsel aan de walsrol (ondanks voldoende bevochtiging) en zakt de wals te

ver weg in het asfalt. Bij een juiste temperatuur treden er geen haarscheurtjes en opstuwing naast de walsrol op en heeft men geen last van kleven, zodat er een gesloten oppervlak ontstaat.

Traditioneel werd de verdichtingstemperatuur bepaald door het plotten van de log-log viscositeit vs. de log temperatuur, waarbij vervolgens de temperatuur bepaald werd bij een viscositeit van 1.7 poise. Corlew en Dickson (1970) geven een minimale temperatuur om te verdichten van 80 graden Celsius en geven door middel van grafieken de tijdlimieten om te verdichten aan. Deze richtlijnen geven inzicht in wanneer er begonnen en geëindigd dient te worden met verdichten, maar geven geen inzicht in de eigenschappen die behaald worden door te verdichten bij een bepaalde temperatuur. Minimale en maximale temperaturen waarbinnen verdicht dient te worden zouden bepaald moeten worden per mengseltype. Later hebben Jordan en Thomas (1976), Daines (1985) en Luoma et al (1995) bruikbare tools ontwikkeld om het temperatuurvenster te bepalen.

Deze aanpakken zijn dus gerelateerd aan de dichtheid bereikt bij een bepaalde temperatuur, waarbij de verdichtingsgraad als parameter voor de kwaliteit wordt gezien. In dit afstudeerproject is onderzocht of de verdichtingstemperatuur hierbij ook een belangrijke parameter voor de kwaliteit is.

Decker (2006) constateert al dat het vaststellen van de mix-temperatuur en de verdichtingstemperatuur met behulp van de temperatuur-viscositeit figuren (bv. Nomogrammen van Heukelom) lang niet altijd meer voldoen. Meer viskeuze bindmiddelen kunnen de temperaturen waarbij verwerkt dient te worden verhogen terwijl er niet altijd genoeg tijd beschikbaar is voor de verdichting. Omdat deze aanpakken heden ten dage niet meer voldoen, zijn verschillende afkoelingsmodellen ontwikkeld om de afkoeling van het asfaltmengsel als functie van de tijd te kunnen voorspellen; Pavecool (Chadbourn et al, 1998), Calcool (Timm et al, 2001), Heat2 en Wegtem (TU Delft). Hieruit zal een keuze gemaakt moeten worden welk afkoelingsmodel gebruikt gaat worden om het tijdsvenster te kunnen bepalen op basis van het ideale temperatuurvenster.

Er is gekozen om het model van Chadbourn et al (1998) (Pavcool) toe te passen, omdat het een geautomatiseerd model is, zodat het snel toepasbaar is. Daarnaast heeft Miller (2008) onderzoek gedaan naar de afkoeling van Nederlandse mengsels en deze vergeleken met de afkoelingscurven in het programma Pavecool (Chadbourn et al., 1998). Hierin wordt geconcludeerd dat de afkoeling van een STAB-laag en een SMA-laag een hoge mate van correlatie vertonen met het programma Pavecool (Miller en Dorée, 2008).

In de literatuur is het verder nog onduidelijk of het in principe beter voor de verdichting is om een hoge temperatuur of een lage verdichtingstemperatuur te hebben. Volgens VBW-asfalt (2003) geldt in principe dat hoe hoger de temperatuur, hoe beter het mengsel te verdichten is. Volgens Van der Velden (2003) geldt dat hoe lager de temperatuur, des te beter de verdichting. Ook is het opvallend dat uit metingen van Ter Huerne (2004) op basis van de onderzochte cases blijkt dat een hogere temperatuur van het materiaal niet leidt tot een beter te verdichten mengsel (bij verschillen tot 33 °C) in tegenstelling tot andere literatuur (Timm et al., 2001; Van der Velden, 2003). In dit afstudeer-onderzoek zijn daarom uitspraken gewenst over welke temperatuur (hoog of laag) in principe een betere verdichting tot gevolg heeft en uitspraken of een verschil in temperatuur invloed heeft op de verdichtbaarheid van asfaltmengsels.

Wel wordt in diverse literatuur (VBW-asfalt, 2003; Ooms (appendix 3.1)) geconcludeerd dat het tot 60 °C nog effectief is om te verdichten. Bij een lagere temperatuur kan er geen verdichtingsprogressie meer bereikt worden en kunnen walsafdrukken en andere onregelmatigheden niet tot moeilijk weggevoerd worden.

Daarnaast concludeert Van Dee (1999) dat het meten van de temperatuur in de asfaltlaag goed kan met thermokoppels. De oppervlaktetemperatuur van de asfaltlaag kan volgens Van Dee (1999) beter worden gemeten met een infrarood camera. In dit onderzoek wordt daarom de temperatuur van het

asfalmengsel met thermokoppels gemeten en de oppervlaktetemperatuur in de praktijkmeting met infraroodcamera's.

Onderzoeksvraag 1.4:

Waar is de temperatuurverdeling over de verticale richting van het asfalmengsel van afhankelijk en wat is het effect van deze temperatuurverdeling?

In de literatuur zijn wel regelmatig metingen naar de verticale temperatuurverdeling binnen een asfaltlaag gedaan, maar hieruit zijn tot nu toe weinig conclusies getrokken. Achtereenvolgens zijn deze metingen beschreven, maar omdat hier geen conclusies uit getrokken zijn dienen deze resultaten met een bepaalde onzekerheid te worden geïnterpreteerd.

Ter Huerne (2004) heeft op die drie plaatsen in de laagdikte de temperatuur gemeten tijdens het verdichtingsproces; de onderkant van de laag, het midden van de laag en de oppervlakte van de laag. Hieruit zijn schattingen gemaakt over de temperatuurverdeling over de laag waarbij is aangegeven dat het midden van de laag het warmst is, de oppervlaktetemperatuur het koudst is en dat de temperatuur van het midden van de laag hiertussen ligt. Daarnaast is geschat dat het midden van de laag in principe sneller afkoelt dan de onderkant van de laag.

Van Dee (1999) concludeert dat het moeilijk is om de afkoeling van een asfaltlaag te voorspellen. De temperatuurcurve is een functie van tijd en diepte in de laag, hetgeen inhoudt dat de materiaaleigenschappen een functie van plaats en tijd zijn. Daarnaast concludeert Van Dee (1999) dat het effect van wind en water moeilijk te voorspellen is.

Timm et al (2001) geven aan dat de temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag afhankelijk is van de ondergrond. Wanneer er meerdere asfaltlagen bovenop elkaar worden aangebracht is de onderliggende laag een warmtebron van de aan te brengen asfaltlaag en dit heeft invloed op de afkoeling van de nieuwe asfaltlaag. Er wordt geconcludeerd dat er rekening gehouden dient te worden met de ondergrond van de asfaltlaag. Hierdoor ziet niet elke temperatuurverdeling eruit zoals Ter Huerne heeft geschat, maar kan de onderkant van een asfaltlaag veel warmer zijn dan verwacht, waardoor het gehele mengsel ook minder snel afkoelt.

Dorée en Miller (2009) hebben onderzoek gedaan naar de temperatuurhomogeniteit en het verdichtingsproces van asfalt voor een STAB- en SMA-mengsel. Bij de onderzochte case hadden het STAB- en SMA-mengsel een goede temperatuurhomogeniteit. Het effect van stopplaatsen op de dichtheid zijn duidelijk vastgelegd. Ze concluderen dat Temperatuur Contour Plots (TCP) een goed instrument zijn om de temperatuurhomogeniteit en stopplaatsen te bepalen. Verder wordt geconcludeerd dat afkoelingscurven redelijk consistent zijn en goed voorspelbaar. Verder stellen ze dat Pavcool goed bruikbaar is voor een aantal Nederlandse asfalmengsels. Uiteindelijk concluderen ze de wisselende omstandigheden tijdens de verdichting in de praktijk (o.a. een dalende temperatuur van het asfalt) een relatie maskeren tussen de dichtheid en het aantal walsovergangen. Niettemin zegt men wel een relatie gevonden te hebben tussen het aantal walsovergangen en de nucleair gemeten dichtheid en de dichtheid van de boorkernen. Dit lijkt een voorbarige conclusie, omdat het effect van de dalende temperatuur op deze variabelen onduidelijk blijft.

Geconcludeerd wordt dat belangrijke parameters die de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag beïnvloeden de laagdikte, de buitentemperatuur, de windsnelheid, neerslag en de temperatuur van de ondergrond zijn.

Verder geven de onderzoeken vaak aan dat het belangrijk is om rekening te houden met het feit dat de temperatuur binnen een asfaltlaag niet gelijk (homogeen) is. Dit geeft wel het nut aan om onderscheid te maken in verschillende temperaturen binnen de asfaltlaag, maar het effect van deze temperatuurverdeling is vooralsnog onduidelijk. Binnen dit afstudeeronderzoek is niet verder ingegaan op het effect van een heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag, maar wel wordt de homogeniteit van de temperatuur van het asfalmengsel bepaald om de variabiliteit te bepalen.

Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen naar het effect van deze heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag.

Theoretisch gezien zou de temperatuur op iedere dikte van de asfaltlaag gemeten kunnen worden (bv. per millimeter), maar in dit afstudeeronderzoek is ervoor gekozen om dit te versimpelen en zal de temperatuur ongeveer per 10 á 20 millimeter gemeten worden, zodat de oppervlaktetemperatuur gemeten zal worden, de temperatuur van het midden van de asfaltlaag en de temperatuur in de onderkant van de asfaltlaag gemeten zal worden. Voor het meten van de temperatuur van het asfaltmengsel zal gebruik worden gemaakt van de thermokoppel draden, die ook goed in het asfalt gestoken kunnen worden.

2.4 Conclusie theorie

Op basis van dit literatuuronderzoek moet duidelijk worden op welke parameters gelet moet worden tijdens het empirisch onderzoek. De conclusie van dit gehele hoofdstuk is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.

Onderzoeksvraag 1:

Welke parameters zijn van invloed op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces?

Om antwoord op deze vraag te kunnen geven zijn een drietal aspecten uitgediept; het asfaltmengsel, het verdichtingsproces en het afkoelingsproces. Deze aspecten zijn uitgediept in de onderzoeksvragen 1.1 tot en met 1.4, hetgeen heeft geresulteerd in een lijst met parameters die van invloed zijn op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces:

- Het asfaltmengsel heeft kenmerken van elastisch, plastisch en viskeus gedrag. Tijdens het verdichtingsproces met de walsen overheersen het viskeuze en elastische gedrag. In het empirisch onderzoek dient er dus rekening mee gehouden te worden dat het asfaltmengsel visco-elastisch gedrag vertoont en dat er een elastisch effect plaats kan vinden na het verdichten, zonder dat deze direct geregistreerd wordt;
- Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen (o.a. regeneratieasfalt, bitumen en vulstof), de vochtigheidsgraad, de verdichtingstemperatuur en de spanningen die uitgeoefend worden op de korrels (verticale belasting, opsluitspanning en hieruit voortvloeiende schuifspanningen);
- Het verdichtingsproces bestaat uit een drietal fasen. In de eerste fase vindt een korrelrangschikking plaats, in de tweede fase vindt de werkelijke verdichting plaats, waarbij door het toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt, en in de derde fase dienen oneffenheden weggewalst te worden;
- Het materiaal ondergaat tijdens het verdichtingsproces een drietal fasen. Tijdens de eerste verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats waar de spanningen op het materiaal het hoogst zijn (boven in de laag). Bij de tweede verdichtingsfase vindt de meeste verdichtingstoename plaats waar het materiaal het zachtst is (onder in de laag). Tijdens de derde verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats daar waar de druk relatief hoog in combinatie met waar het materiaal nog relatief zacht is (midden van de laag);
- Belangrijke parameters waarmee rekening gehouden dient te worden bij de afkoeling van het asfaltmengsel tijdens verdichting zijn de temperatuur bij de asfaltcentrale, de temperatuur tijdens aanbrennen, de temperatuur van de ondergrond, het verwerkingsproces en walsregimes, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte, de dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid, neerslag en zonnewarmte, warmtestraling). Er is gekozen om de afkoeling van het asfaltmengsel met het model van Chadbourn et al (1998) (Pavecool) te voorspellen;

- Belangrijke parameters die de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag beïnvloeden tijdens verdichting zijn de laagdikte, de buitentemperatuur, de windsnelheid, neerslag en de temperatuur van de ondergrond. Binnen dit afstudeeronderzoek is niet verder ingegaan op het effect van een heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag op de mechanische eigenschappen. Aanbevolen wordt om in de toekomst onderzoek te doen naar het effect van deze heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag op de mechanische eigenschappen van het asfalt.

Nu duidelijk is welke parameters belangrijk zijn in het empirisch onderzoek, wordt in het volgende hoofdstuk ingegaan op dit empirisch onderzoek.

3 Empirische onderzoeken – laboratorium en praktijk

Het doel van het afstudeeronderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvenster voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Het idee bestaat dat er een venster van temperaturen is, en dus een tijdsvenster, waarop, met een hoge mate van waarschijnlijkheid, de beoogde mengseleigenschappen uit het ontwerp 100% bereikt kunnen worden. Daarom is er empirisch onderzoek gedaan naar de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. In het literatuuronderzoek (hoofdstuk 2) is een lijst met parameters beschreven die belangrijk zijn in dit empirisch onderzoek.

Het doel van het empirisch onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Het empirisch onderzoek bestaat uit het doen van laboratoriumexperimenten en het doen van metingen in de praktijk. In dit hoofdstuk zijn ten eerste de proeven en meetinstrumenten voor het empirisch onderzoek beschreven, waarna vervolgens de resultaten van het empirisch onderzoek, uit het laboratorium en de praktijkcase, zijn beschouwd. Uiteindelijk zijn de belangrijkste conclusies van het empirisch onderzoek beschreven. In de appendix naast dit rapport is de uitgebreide verslaglegging van het empirisch onderzoek, met alle bevindingen uit het laboratoriumonderzoek en de praktijkmeting, terug te vinden.

Zoals beschreven in het onderzoeksontwerp (hoofdstuk 1) is er empirisch onderzoek uitgevoerd op een STAB 0/16 asfaltmengsel zonder PR (AC base O1 40/60). De materiaalsamenstelling, de gradering en het zandpunt van dit mengsel zijn weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1: Materiaalsamenstelling, gradering en zeefpunt STAB 0/16 mengsel (zonder PR)

STAB 0/16 zonder PR (AC base O1 40/60)					
Materiaalsamenstelling		Gradering		Zandpunt	
Materiaal	Percentage	Op zeef	Percentage	Op zeef	Percentage
Bestone 4/8	22,1 %	C31,5	0,0	2 mm-500 µm	20
Graniet 8/16	35,4 %	C22,4	0,0	500 µm – 180 µm	55
Rivierzand	18,4 %	C16	3,3	180 µm – 63 µm	25
Wieringervlaakzand	10,5 %	C11,2	24,4		
Zeezand	7,3 %	C8	35,0		
Wigras 40K	6,3 %	C5,6	48,9		
Bitumen 40/60	4,5 %	C4	54,6		
		2 mm	57,0		
		500 µm	64,4		
		180 µm	84,8		
		63 µm	94,0		

3.1 Proeven en meetinstrumenten

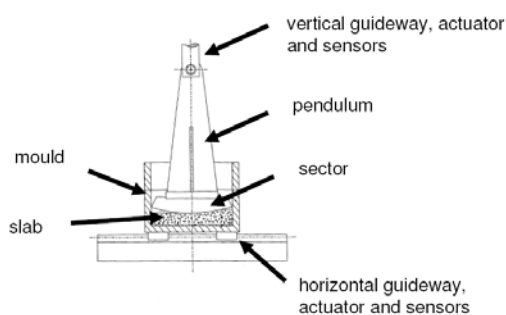
In deze paragraaf worden de proeven en meetinstrumenten die in het empirisch onderzoek zijn gebruikt toegelicht. Er kunnen enorme verschillen tussen verschillende verdichtingsmethoden, verschillende temperatuurmetingen en het bepalen van mechanische eigenschappen ontstaan door deze op verschillende manieren te meten of uit te voeren. Het is daarom van belang om te beschrijven welke proeven en uitgangspunten zijn gehanteerd en waarmee gemeten is. Daarom is achtereenvolgens ingegaan op de manier van verdichten, het meten van de temperatuur en de mechanische proeven in dit onderzoek. Uiteindelijk is een overzicht van de asfaltplaten gemaakt in het laboratorium en van de kernen uit de praktijkmeting weergegeven.

Zoals besproken in de theorie (hoofdstuk 2) worden de STAB 0/16 mengsels (zonder PR) in het laboratorium verdicht met de walssegmentverdichter (de Freundl plaatverdichter WSV-2008-KW50/500). In figuur 3.1a-c zijn respectievelijk de Freundl plaatverdichter, het principe van de verdichter en het resultaat weergegeven. Het principe van de Freundl plaatverdichter is een hydraulisch heen en weer bewegende walssector die met een bepaalde kracht het materiaal, in een ook heen en weer bewegende mal, verdicht. In de mal en de walssector zijn sensoren bevestigd om de verplaatsingen en krachten te meten. De mal is een bak van 50 cm bij 50 cm en 30 cm hoog. De walssector is 50 cm breed en heeft een diameter van 1,10 m. De krachten worden gemeten door het hydraulisch systeem (druk) en de verplaatsingen worden gemeten door LVDT's (linear variable differential transformers).

De walsrolkarakteristiek van de Freundl plaatverdichter is afhankelijk van de kracht; volgens de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt (2000) (zie formule 2.2) is bij een kracht van 15 kN de walskarakteristiek bijvoorbeeld 24 en bij 30 kN is deze walskarakteristiek bijvoorbeeld 49.



Figuur 3.1a: Freundl plaatverdichter



Figuur 3.1b: Principe (Martus en Nussbaum, 2009)



Figuur 3.1c: Resultaat

Het aantal walsovergangen, de maximale belasting en de verdichtingsprogressie kunnen rechtstreeks uit de data van de Freundl plaatverdichter worden afgelezen. De cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie worden berekend met respectievelijk formule 3.1 en 3.2:

$$P_{cum} = \int_1^n f(N)dx \quad \text{F3.1}$$

Waarbij:

P_{cum} = cumulatieve kracht (kN)

n = walsovergangen (st)

N = kracht per walsovergang (kN)

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^n (P \cdot \rho) \quad \text{F3.2}$$

Waarbij:

E_{tot} = Totale energie (Nm=J)

n = walsovergangen (st)

P = kracht per walsovergang (N)

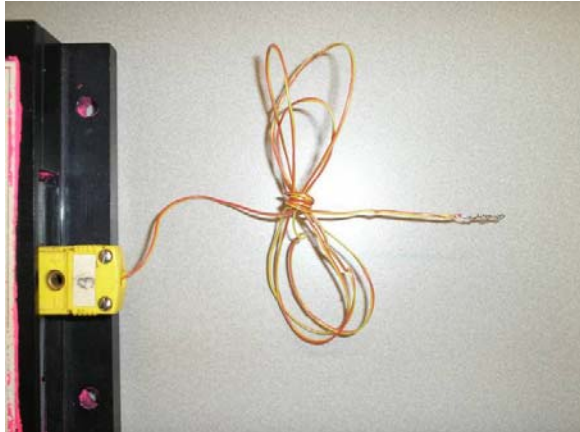
ρ = dichtheidsprogressie per walsovergang (m)

Zoals besproken in het hoofdstuk theorie is met de Freundl plaatverdichter volgens een tweetal walsprocedures verdicht, gebaseerd op de procedures van Mollenhauer (2008) (figuur 2.6 en 2.7). De testen en gebruikte instellingen voor de verschillende verdichtingsprocedures zijn in de appendix naast dit afstudeerverslag beschreven.

Van het proces van het verdichten met de Freundl plaatverdichter is een fotoreportage gemaakt om te laten zien hoe het verdichten met de Freundl plaatverdichter gaat. In appendix 4.1 is deze fotoreportage weergegeven van het proces met de Freundl plaatverdichter.

De temperatuur van het asfaltmengsel is met thermokoppels gemeten. Het meten van de temperatuur dient inzicht te geven in de homogeniteit van de temperatuur van het asfaltmengsel. Het doel hiervan is dus om duidelijk aan te kunnen geven bij welke temperatuur verdicht wordt en hoe groot de variabiliteit van de temperatuur, in verticale en horizontale richting, van het asfalt is.

Een voorbeeld van een thermokoppeldraad aangesloten op een datalogger is weergegeven in figuur 3.2. Het principe van een thermokoppel is twee gekoppelde draden van verschillende metalen waarbij temperatuurverschillen worden omgezet in een elektrische spanning evenredig met het temperatuurverschil. In figuur 3.3 is het aanbrengen van de thermokoppels weergegeven.



Figuur 3.2: Voorbeeld thermokoppeldraden met datalogger



Figuur 3.3: Aanbrengen thermokoppels

Om te bepalen of de thermokoppels de juiste temperatuur meten (en doorgeven aan de datalogger) zijn de thermokoppels gekalibreerd. De uitvoering en de resultaten hiervan zijn weergegeven in de appendix. Uit deze kalibratie is geconcludeerd dat de thermokoppels maximaal een afwijking hebben van 4 graden Celsius en de gemiddelde afwijking is 1,9 graad Celsius met een standaardafwijking van 1,2 graden Celsius. Voor dit onderzoek is dit voldoende, omdat in dit onderzoek niet het temperatuurvenster op één graad nauwkeurig wordt onderzocht, maar er wordt onderzocht of het fenomeen, dat de streefdichtheid wordt bereikt bij verschillende verdichtingstemperaturen maar verschillende mechanische eigenschappen tot gevolg heeft, voorkomt.

In figuur 3.4 is het resultaat van de thermokoppels in de verticale richting van het asfalt weergegeven. Tijdens het aanbrengen van het (losse) asfaltmengsel in de mal van de Freundl plaatverdichter worden de thermokoppels in de onderkant, het midden en de bovenkant van de asfaltlaag aangebracht. De output van de datalogger met de thermokoppeldraden is de temperatuur in de loop van de tijd op een bepaalde plaats. Op basis van deze output kunnen de homogeniteit van de temperatuur in verticale richting, de afkoeling tijdens de verdichting en de tijd waarin het asfaltmengsel afkoelt van 130 °C tot 30 °C worden bepaald. Deze aspecten vormen de vergelijkingscriteria voor de verdichtingstemperaturen.

Resultaat aanbrengen thermokoppels



Figuur 3.4: Resultaat aanbrengen thermokoppels aan de (linker)zijkant van de asfaltlaag

Om de mechanische eigenschappen te bepalen zijn 6 splijtproeven en 3 triaxiaalproeven per plaat uitgevoerd. Deze mechanische proeven zijn uitgevoerd op proefstukken met een diameter van 100 mm en een dikte van 60 mm. Per plaat zijn 3 triaxiaalproeven (met de Nottingham Asphalt Tester) en 6 splijtproeven (met de Marshallpers) uitgevoerd, oftewel er zijn 9 boorkernen uit de plaat geboord. De proefstukken zijn twee weken na het boren en slijpen beproefd. Een uitgebreide beschrijving van de principes en uitgangspunten van de proeven is weergegeven in de aparte appendix bij dit afstudeer verslag.

In de splijtproef wordt een cilindrisch proefstuk diametraal belast door deze met een constante snelheid van 0,85 mm per seconde te belasten. Tijdens de proef wordt een belastingsvervormingscurve ontwikkeld, waaruit de maximale kracht en de splijtsterkte kunnen worden bepaald, waarbij die splijtsterkte een benadering van de treksterkte is. De oppervlakte onder de belastingsvervormingskromme dient als maat voor de splijtenergie en de scheurtaaiheid (VBW-asfalt, 2000). De vergelijkingscriteria om de verschillen tussen de verdichtingstemperaturen te bepalen zijn de splijtsterkte, de scheurtaaiheid en de scheursnelheid. De splijtproef is uitgevoerd volgens EN-12697-23, waarbij opgemerkt moet worden dat de proefstukken geconditioneerd zijn op 5 °C voor minimaal 4 uur.

Met de triaxiaalproef wordt de weerstand van het materiaal tegen de opbouw van permanente vervorming bepaald, oftewel de vervormingsgevoeligheid van een mengsel onder herhaalde omstandigheden. Op een proefstuk worden radiale en axiale belastingen uitgeoefend, waarbij gedurende de proef de toename van de vervorming in axiale richting wordt gevolgd. Het resultaat van de proef is een kruipcurve, oftewel de relatie tussen de vervorming op een bepaald moment gedurende de puls en de hoeveelheid opgelegde belastingspulsen sinds de start van de proef. De output van de triaxiaalproef is het aantal belastingspulsen uitgezet tegenover de procentuele permanente deformatie (cumulatieve rek), waaruit een weerstand tegen spoorvorming kan worden bepaald. De procentuele permanente deformatie is het vergelijkingscriterium om verschillen tussen de verdichtingstemperaturen te bepalen. De triaxiaalproef is uitgevoerd volgens EN-12697-25, waarbij de beproevingstemperatuur 40 °C is, en het proefstuk minimaal 4 uur is geconditioneerd bij deze temperatuur. Verder is het proefstuk, met de NAT (Nottingham Asphalt Tester), met een blokpuls belast in plaats van een sinus puls, en is twee keer zo zwaar belast als volgens de NEN-norm. Het proefstuk is belast met een (axiale) blokpuls van 0,45 MPa met een belastingsduur van 400 ms per seconde (dus een rustduur van 600 ms). Hierbij is een opsluitspanning van 0,05 MPa toegepast. Als wrijvingsreductie zijn twee lagen plastic met siliconenvet daartussen toegepast (Erkens, 2002). Het aantal lastherhalingen is 10.000 zonder voorbelastingen.

In totaal zijn in het laboratorium 24 asfaltplaten met de Freundl plaatverdichter verdicht. Er zijn 12 platen positie gestuurd verdicht (3 platen voor 4 verdichtingstemperaturen) en er zijn, om tijdsredenen, 6 platen kracht gestuurd verdicht (2 platen voor 3 verdichtingstemperaturen). Variabele karakteristieken van de platen zijn (1) de manier van verdichten en (2) de asfalttemperatuur bij het begin van verdichten. In tabel 3.2 zijn de karakteristieken per plaat weergegeven. De platen 2 en 5 zijn verdicht in 1 fase om te testen, en zijn verder niet gebruikt in de analyse. Plaat 3 is mislukt, omdat vergeten was om de mal aan te brengen en van plaat 18 is geen data verkregen, omdat er een stekker loszat. Ook deze platen zijn verder niet in de analyse meegenomen.

Tabel 3.2: Karakteristieken platen laboratorium

Plaatnummer	Verdichting	Verdichtingstemperatuur begin verdichten (°C)	Opmerkingen
1	Positie-gestuurde verdichting	139	
2	"	147	Test: verdichten in 1 fase
3	"	135	Plaat mislukt
4	"	149	

5	"	98	
6	"	120	Test: verdichten in 1 fase
7	"	104	
8	"	102	
9	"	126	
10	"	82	
11	"	92	
12	"	80	
13	"	158	
14	"	166	
15	"	170	
16	Kracht-gestuurde verdichting	140	
17	"	135	
18	"	137	Geen data verkregen
19	"	138	
20	"	140	
21	"	88	
22	"	89	
23	"	169	
24	"	166	

In tabel 3.3 zijn de karakteristieken per baan van de praktijkmeting weergegeven. Bij de praktijkmeting zijn 14 kernen in 3 banen die bij verschillende temperaturen zijn verdicht, geboord, dus in totaal 42 kernen. In de kolom opmerkingen zijn de kernen genoemd die onvoldoende laagdikte hebben gehaald om te kunnen beproeven. De temperatuur van het asfalt is wederom gemeten met behulp van thermokoppels. Om de mechanische eigenschappen te bepalen is, om tijdsredenen, gekozen om alleen splijtproeven te doen.

Tabel 3.3: Karakteristieken kernen praktijkmeting

Baan	Proefstukken	Verdichtingstemperatuur begin verdichten (°C)	Opmerkingen
1	1-14	130	Proefstukken 13 en 14 hebben onvoldoende laagdikte
2	15-28	110	Proefstukken 20, 23,24,25, 28 hebben onvoldoende laagdikte
3	29-42	90	Proefstuk 36 heeft onvoldoende laagdikte

3.2 Laboratoriumonderzoeken

In deze paragraaf zijn de belangrijkste resultaten en conclusies van het laboratoriumonderzoek weergegeven en geanalyseerd. In de appendix is het uitgebreide laboratoriumrapport met alle bevindingen terug te vinden.

3.2.1 Doel en concept laboratoriumonderzoek

Het doel van het laboratoriumonderzoek is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen onder gecontroleerde condities. Om dit te bereiken zijn STAB 0/16 mengsels (zonder PR) bij verschillende temperaturen verdicht, waarbij de dichtheidsprogressie en de mechanische eigenschappen zijn bepaald.

In het laboratoriumonderzoek is met de Freundl walssegmentverdichter op een tweetal manieren verdicht. De eerste manier is een positiegestuurde verdichting, waarbij tot een beoogde laagdikte (80 mm) verdicht is. De tweede manier is een krachtgestuurde verdichting, waarbij met een vaste kracht (15 kN/cm) verdicht wordt. De eerste manier toetst of de mechanische eigenschappen verschillen bij verschillende verdichtingstemperaturen en de tweede manier toetst of het überhaupt mogelijk is om met een vaste, realistische, kracht bij verschillende verdichtingstemperaturen tot de streefdichtheid te komen en ook welke mechanische consequenties dit heeft.

3.2.2 Resultaten laboratoriumonderzoek

De resultaten van het laboratoriumonderzoek zijn onderverdeeld in (1) de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het gehele proces, (2) de verdichting en de behaalde dichtheid en (3) de behaalde mechanische eigenschappen.

3.2.2.1 *Temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verwerking*

Bij de positie gestuurde verdichting zijn er 12 asfaltplaten verdicht met de Freundl plaatverdichter gestuurd op 80 mm laagdikte bij verschillende verdichtingstemperaturen variërend van 80 °C tot 170 °C gemeten met de thermokoppels. De uiteindelijke verdichtingstemperaturen zijn weergegeven in tabel 3.2. Het maximale temperatuurverschil in de asfaltplaten is 14 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 9 °C, hetgeen duidt op een redelijk homogene temperatuur binnen de asfaltplaat. Bij de kracht gestuurde verdichting zijn er 6 asfaltplaten met een zelfde verdichtingskracht verdicht met de Freundl plaatverdichter bij verschillende verdichtingstemperaturen variërend van 80 °C tot 170 °C. Het maximale temperatuurverschil in de asfaltplaten is 17 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 12 °C, hetgeen duidt op een redelijk homogene temperatuur binnen de asfaltplaat. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de temperaturen aan de zijkant van de asfaltplaat gemeten zijn, waarvan verwacht wordt dat daar de grootste temperatuurverschillen optreden, dus zijn de gemeten verschillen zeer waarschijnlijk ook echt de maximale verschillen.

Uit de analyse is geconcludeerd dat de temperatuurhomogeniteit binnen de platen goed is en dat de platen volgens de beoogde verdichtingstemperaturen verdicht zijn.

3.2.2.2 *Verdichting en dichtheid*

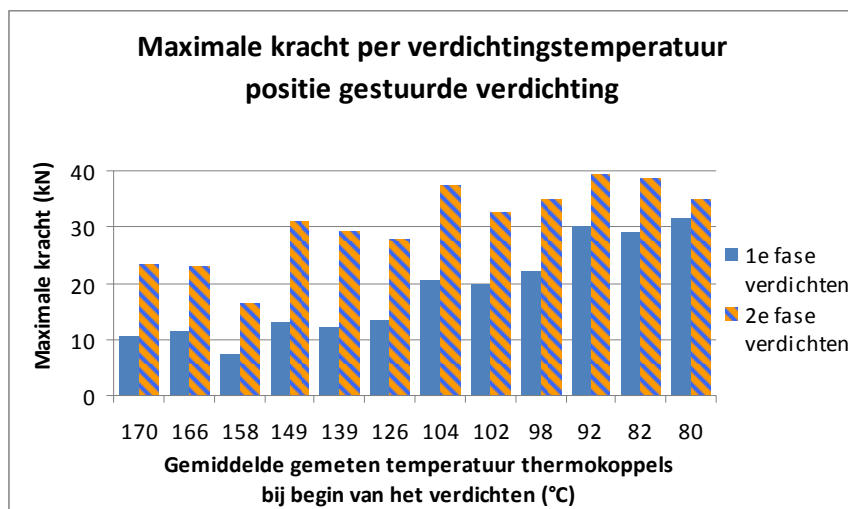
De asfaltmengsels zijn verdicht met de Freundl plaatverdichter tot een bepaalde dichtheid. Achtereenvolgens zijn de kracht en energie die voor de verdichting nodig zijn geweest en de bereikte dichtheid geanalyseerd.

Het verdichten van de asfaltmengsels is in twee fasen uitgevoerd, waarbij in de eerste fase een korrelrangschikking plaats kan vinden, waarbij de stenen langs elkaar kunnen glijden en in de tweede fase de werkelijke verdichting (met de wals) plaatsvindt, gebaseerd op de fasen van het verdichtingsproces (paragraaf 2.2).

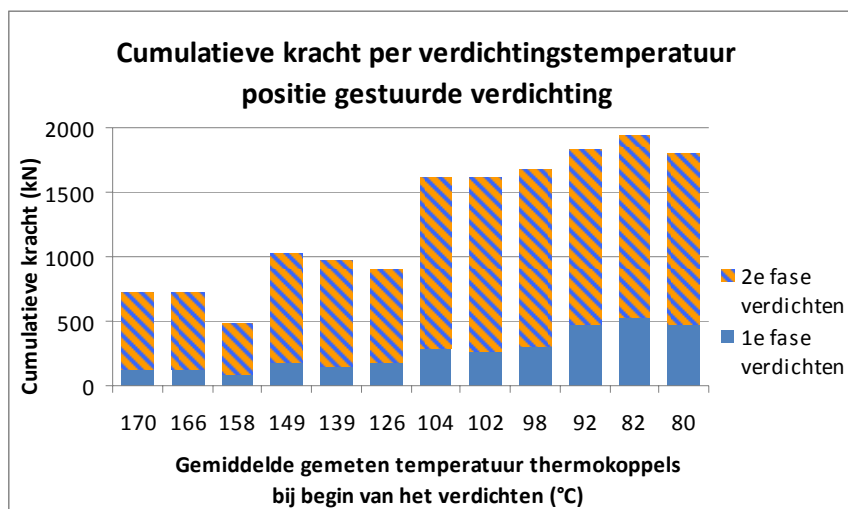
Bij de positie-gestuurde verdichting wordt de verdichtingsprogressie gestuurd en zijn dus het aantal walsovergangen, de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie voor de verdichtingstemperaturen met elkaar vergeleken. Bij de kracht-gestuurde verdichting wordt het aantal walsovergangen en de verdichtingskracht (en dus ook de cumulatieve kracht) gestuurd en dus vormen de verdichtingsprogressie en de verdichtingsenergie de vergelijkingscriteria.

Voor wat betreft het aantal walsovergangen geldt dat er geen tot weinig verschil zit in het aantal walsovergangen dat nodig is om tot een laagdikte van 80 mm te verdichten bij de verschillende verdichtingstemperaturen. De norm (EN 12697-33) geeft aan dat het goed is om met 10 tot 50 walsovergangen te verdichten en de resultaten van alle verdichtingstemperaturen voldoen aan deze norm.

Voor wat betreft de maximale verdichtingskracht en cumulatieve kracht om te verdichten valt te concluderen dat er meer kracht nodig is wanneer de verdichtingstemperatuur afneemt. Dit is geïllustreerd met figuur 3.5 voor de maximale verdichtingskracht en met figuur 3.6 voor de cumulatieve verdichtingskracht. De meest logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen meer viskeus zijn waardoor er meer kracht nodig is om het mengsel nader tot elkaar te brengen. Krachten in de Freundl plaatverdichter die boven de 30 kN liggen zijn in de praktijk vrijwel ondenkbaar, omdat er dan zo'n zware wals nodig is die in de praktijk niet verkrijgbaar is. Dit is het geval bij verdichtingstemperaturen lager dan 104 °C. Bij verdichtingstemperaturen hoger dan 149 °C is er maar weinig kracht nodig om het asfaltmengsel te verdichten. Bij deze temperaturen zal er dus met een lichtere wals verdicht moeten worden (ongeveer 6000 kg), anders wordt het bitumen door het steenskelet naar boven gedrukt en zal het mengsel vet slaan.



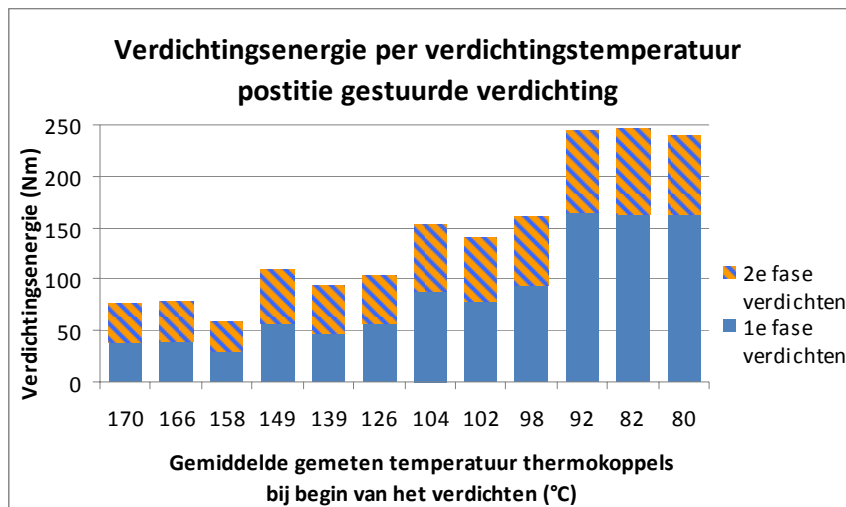
Figuur 3.5: Maximale verdichtingskracht per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting



Figuur 3.6: Cumulatieve verdichtingskracht per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

Uit de analyse van de verdichtingsenergie (in Nm, oftewel joule) blijkt ook dat de verdichtingsenergie toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. In figuur 3.7 (positie gestuurde verdichting) is deze relatie goed zichtbaar. Evenals bij de maximale kracht en de cumulatieve verdichtingskracht, lijkt de meest logische verklaring hiervoor dat de bitumen meer viskeus zijn waardoor er meer energie nodig is om het mengsel nader tot elkaar te brengen. De relatie bij de kracht gestuurde verdichting is

minder duidelijk, omdat de maximale verdichtingskracht gestuurd is en bij alle verdichtingstemperaturen gelijk is gehouden.

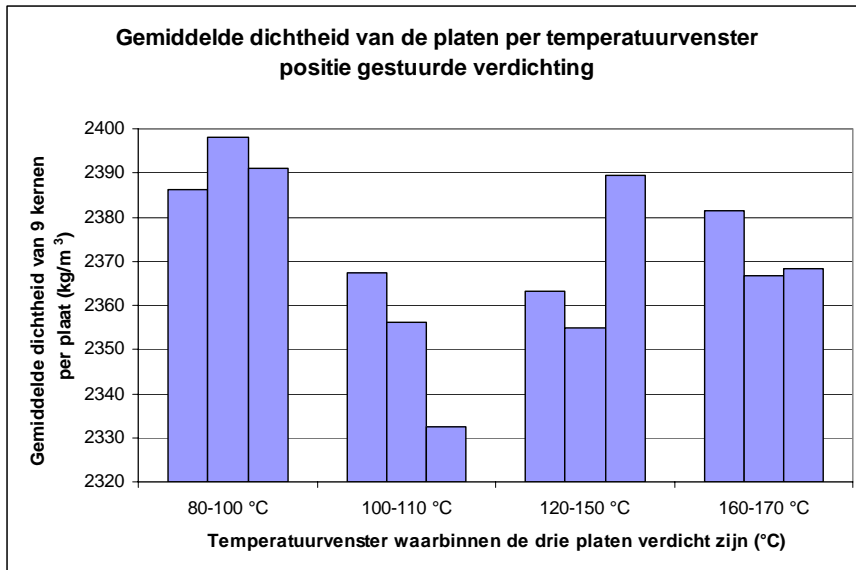


Figuur 3.7: Verdichtingsenergie per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

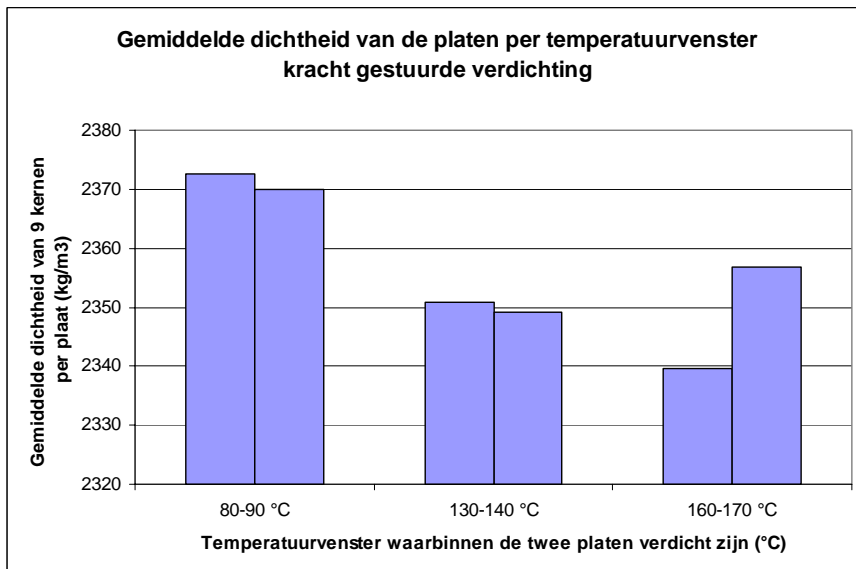
Opvallend bij de verdichtingsprogressie van de kracht-gestuurde verdichting is de eindlaagdikte die de Freundl plaatverdichter meet per verdichtingstemperatuur. De lagere verdichtingstemperaturen bereiken een eindlaagdikte van gemiddeld 82,6 mm, de gemiddelde verdichtingstemperaturen een eindlaagdikte van 81,9 mm en de hogere verdichtingstemperaturen bereiken een gemiddelde eindlaagdikte van 81,4 mm. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij een lagere verdichtingstemperatuur het moeilijker wordt om de eindlaagdikte te behalen.

Vervolgens zijn uit de asfaltplaten negen kernen per plaat geboord en geslepen, waarbij de dichtheden van de asfaltplaten zijn geanalyseerd. Bij de positie gestuurde verdichting is het effect van het slijpen op de dichtheid van de kernen bij alle verdichtingstemperaturen vrijwel gelijk en dus heeft het slijpen van de kernen geen verschillend effect per verdichtingstemperatuur. Bij de kracht gestuurde verdichting is er door het slijpen van de proefstukken meer dichtheidsverbetering bij de hoge verdichtingstemperaturen (160-170 °C) dan bij de overige verdichtingstemperaturen en dus is er wel een verschillend effect van het slijpen per verdichtingstemperatuur. Desalniettemin zijn de mechanische eigenschappen voor de kracht gestuurde verdichting wel met elkaar vergeleken.

Daarna zijn de gemiddelde dichtheden van de platen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd. Hierbij valt bij beide verdichtingsprocedures op dat de dichtheden bij een verdichtingstemperatuur rond de 80 °C een stuk hoger liggen dan de dichtheden van de overige verdichtingstemperaturen. Dit is weergegeven in figuur 3.8 voor de positie gestuurde verdichting en in figuur 3.9 voor de kracht gestuurde verdichting. Dit is opvallend, omdat de temperatuur van het mengsel lager is en dus minder viskeus. De oorzaak hiervan is onduidelijk; wellicht treedt er verbrijzeling op, is de korreloriëntatie anders, wordt er een hogere stijfheid gehaald, etc. Een mogelijke verklaring hiervoor is de stijve onderlaag en goede opsluiting van het proefstuk. Om te bepalen of er verbrijzeling is opgetreden zijn er extracties op de geslepen kernen uitgevoerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen verbrijzeling in de tweede tot en met de zevende centimeter heeft plaatsgevonden (de eerste en achtste centimeter zijn er afgeslepen, dus daar is niets van bekend). Verder verschillen de dichtheden van de overige temperatuurvensters niet significant. Hieruit kan geconcludeerd worden dat in het laboratorium zelfs bij een verdichtingstemperatuur van 80 °C met de Freundl plaatverdichter de streefdichtheid gehaald kan worden.



Figuur 3.8: Dichtheden per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting



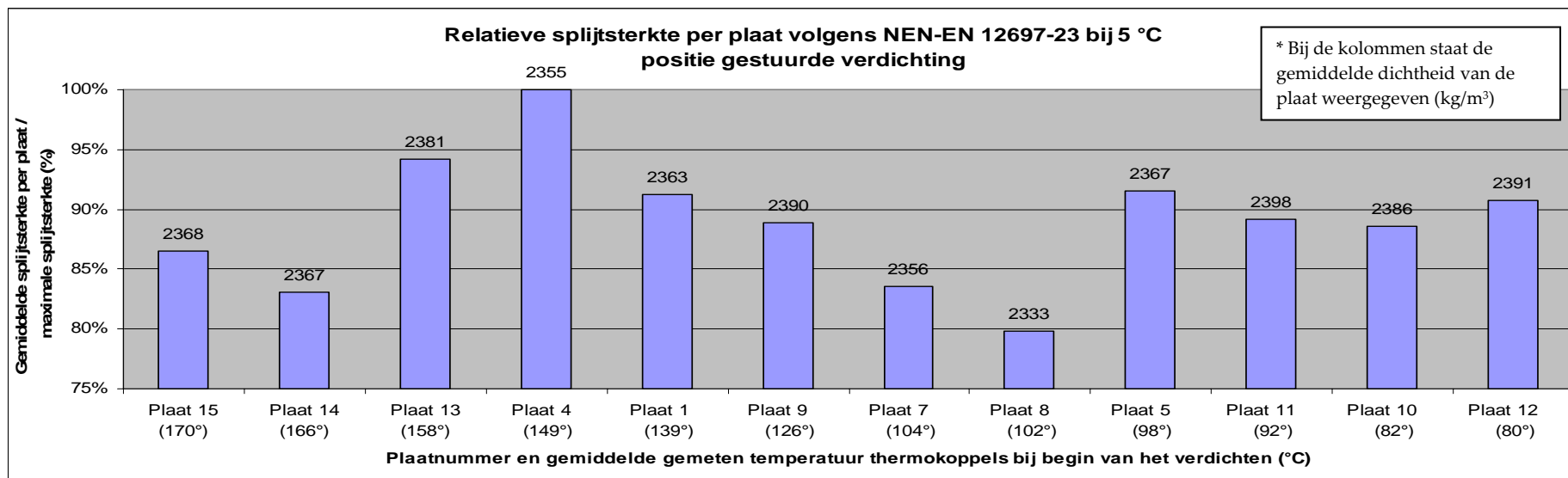
Figuur 3.9: Dichtheden per verdichtingstemperatuur kracht gestuurde verdichting

Verder valt op dat de positie gestuurde verdichting structureel tot hogere dichtheden leidt. Dit is logisch, omdat bij kracht gestuurd verdichten de verdichtingskracht beperkt is en bij positie gestuurd verdichting onbeperkt.

3.2.2.3 Mechanische eigenschappen

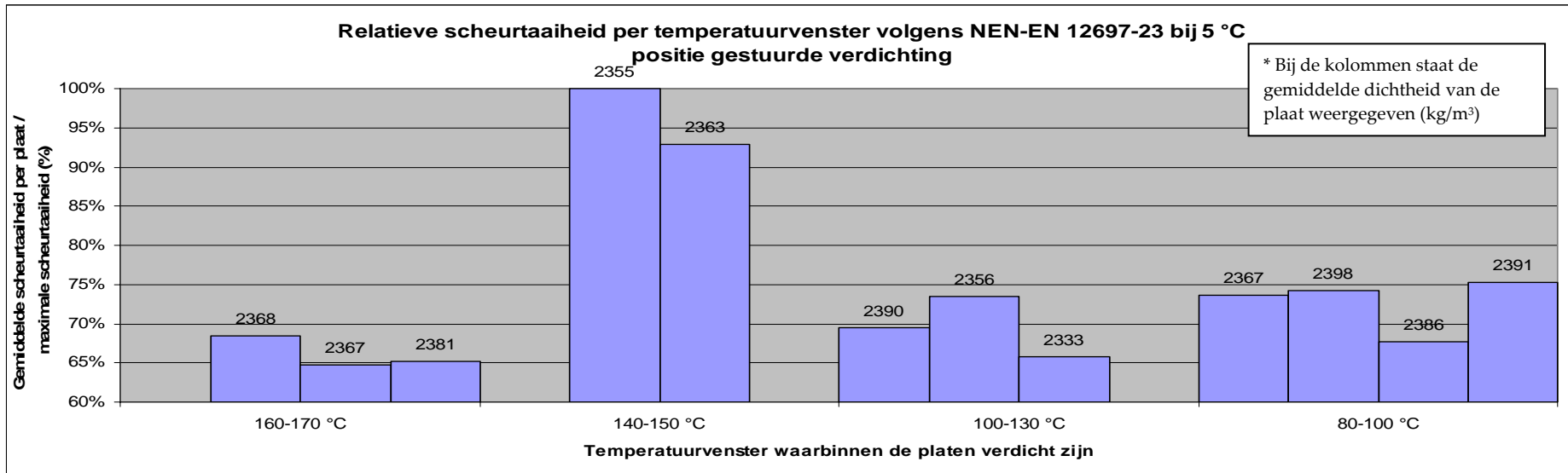
Na het analyseren van de dichtheden zijn de mechanische eigenschappen van de kernen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd op basis van de splijtsterkte, de scheurtaaiheid, de relatieve scheursnelheid en de permanente deformatie.

Tussen de verdichtingstemperatuur en de splijtsterkte lijkt er een verband zichtbaar. In figuur 3.10 is de relatieve splijtsterkte voor de verschillende verdichtingstemperaturen voor de positie gestuurde verdichting weergegeven en er lijkt er een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua slijpsterkte tussen de 149 °C en 158 °C. Verdichtingstemperaturen van 98 °C tot 80 °C hebben weer een hogere splijtsterkte. Een mogelijke verklaring is de hoge dichtheid die deze proefstukken hebben gehaald. De hoge en gemiddelde verdichtingstemperaturen hebben ongeveer 10% minder splijtsterkte (ongeveer 0,3 MPa) dan de optimale verdichtingstemperaturen. De resultaten van de kracht gestuurde verdichting bevestigen deze relatie.



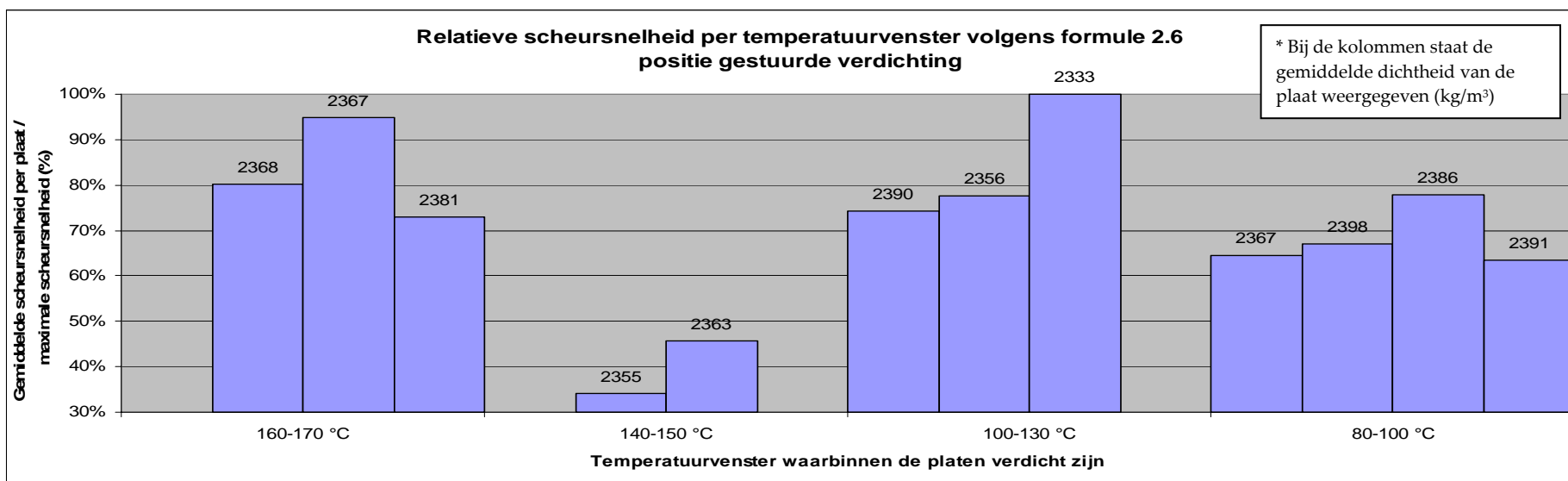
Figuur 3.10: Relatieve splijtsterkte per plaat positie gestuurde verdichting

Tussen de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur is er heel duidelijk verband zichtbaar. In figuur 3.11 is de relatieve scheurtaaiheid van de positie gestuurde verdichting weergegeven. In deze figuur is te zien dat de platen verdicht in het temperatuurvenster van 140 °C tot 150 °C duidelijk een hogere scheurtaaiheid hebben dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Gemiddeld is de scheurtaaiheid in dit temperatuurvenster 1,0-2,0 N.mm/mm² hoger dan bij de overige temperatuurvensters en dat betekent een afname van ongeveer 30-40% scheurtaaiheid bij de overige verdichtingstemperaturen ten opzichte van het temperatuurvenster 140-150 °C. Er is geen verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en dichtheid. Platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid. Hieruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid. De kracht gestuurde verdichting bevestigt deze relatie.



Figuur 3.11: Relatieve scheurtaaiheid per plaat positie gestuurde verdichting

Deze relatie is ook zichtbaar tussen de scheursnelheid en de verdichtingstemperatuur en is weergegeven in figuur 3.12. De platen verdicht in het temperatuurvenster van 140 °C tot 150 °C hebben duidelijk een lagere scheursnelheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Relatief is de scheursnelheid in het temperatuurvenster van 140 °C tot 150 °C, 40% lager dan de scheursnelheid bij de overige verdichtingstemperaturen en dus is de verdichtingstemperatuur ook een belangrijke parameter voor de scheursnelheid. Wederom bevestigt de kracht gestuurde verdichting deze relatie.



Figuur 3.12: Relatieve scheursnelheid per plaat positie gestuurde verdichting

Voor wat betreft de permanente deformatie is de relatie niet heel duidelijk en variëren de resultaten binnen een plaat relatief veel. Daardoor is er geen relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de permanente deformatie vastgesteld.

De twee verdichtingsprocedures hebben geleid tot verschillende mechanische eigenschappen. Uit een vergelijking is geconcludeerd dat de positie gestuurde verdichting structureel tot betere mechanische eigenschappen leidt in de vorm van scheurtaaiheid en scheursnelheid. Gemiddeld hebben de proefstukken die positie gestuurd verdicht zijn 10-25% meer scheurtaaiheid en 15-35% minder scheursnelheid. Dit is logisch, omdat bij kracht gestuurd verdichten de verdichtingskracht beperkt is en bij positie gestuurd verdichting onbeperkt. Aan de hand van de praktijkmeting kan geconcludeerd worden welke procedure de werkelijkheid het meest benaderd.

3.2.3 Conclusies laboratoriumonderzoek

Uit het laboratoriumonderzoek blijkt dat de beoogde dichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen in het laboratorium gehaald kan worden, maar dat er wel een groot verschil tussen de scheurtaaiheid en scheursnelheid bij verschillende verdichtingstemperaturen bestaat.

De resultaten van het laboratoriumonderzoek zijn geanalyseerd op (1) de kracht en energie die nodig is om te verdichten en de daarbij horende verdichtingsprogressie, (2) de bereikte dichtheid en (3) de mechanische eigenschappen. Deze resultaten zijn beschreven aan de hand van de subonderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2.1:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie onder laboratoriumomstandigheden?

Uit de positie- en kracht gestuurde verdichting kan geconcludeerd worden dat de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie toenemen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Dit is logisch, omdat de bitumen minder viskeus zijn en er dus meer kracht en energie nodig is om het mengsel nader tot elkaar te brengen. Bij de verdichtingstemperaturen lager dan 100 °C is in het laboratorium een onrealistisch grote kracht nodig om te verdichten en bij verdichtingstemperaturen hoger dan 150 °C dient er rekening mee worden gehouden dat er minder kracht nodig is om te verdichten en dus met een lichtere wals verdicht moet worden.

Onderzoeksvraag 2.3:

Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen onder laboratoriumomstandigheden?

Er is geconcludeerd dat bij beide verdichtingsprocedures het goed mogelijk is om bij alle verdichtingstemperaturen de streefdichtheid in het laboratorium te behalen. Bij de kracht gestuurde verdichting bij lage temperaturen wordt het wel moeilijker, maar de streefdichtheid kan wel bereikt worden.

Bij vergelijking van de twee gekozen verdichtingsprocedures in het laboratorium (bij de gekozen verdichtingskracht en laagdikte) valt op dat de gekozen positie gestuurde verdichting structureel tot hogere dichtheden leidt. Dit is logisch, omdat bij kracht gestuurd verdichten de verdichtingskracht beperkt is en bij positie gestuurd verdichten onbeperkt. Dit wil niet zeggen dat de positie gestuurde verdichting de werkelijkheid het best simuleert. Aan de hand van de praktijkmeting kan geconcludeerd worden welke procedure de werkelijkheid het meest benaderd.

Onderzoeksvraag 3.1:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen onder laboratoriumomstandigheden?

Voor de kracht- en positie gestuurde verdichting zijn de mechanische eigenschappen in het laboratorium geanalyseerd. Bij de positie gestuurde verdichting lijkt er tussen de splijtsterkte en de verdichtingstemperatuur een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua slijpsterkte tussen de 149 °C en 158 °C. De splijtsterkte van 98 °C tot 80 °C hebben weer een hogere splijtsterkte. Een mogelijke verklaring hiervoor is de hoge dichtheid die deze proefstukken hebben gehaald. De hoge verdichtingstemperaturen (166 °C en 170 °C) en de gemiddelde verdichtingstemperaturen (104 °C en 102 °C) hebben ongeveer 10% (ongeveer 0,3 MPa) minder splijtsterkte hebben dan de overige verdichtingstemperaturen. Bij de kracht gestuurde verdichting behalen de hogere verdichtingstemperaturen (166 °C en 169 °C) duidelijk een lagere splijtsterkte (8%).

Verder is bij beide procedures, ondanks dat de streefdichtheid is behaald, een groot verschil in scheurtaaiheid en scheursnelheid tussen de verdichtingstemperaturen te zien. Verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Tussen de scheursnelheid en scheurtaaiheid, en de dichtheid is bij beide procedures geen relatie gevonden; platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid en hoge scheursnelheid, waaruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid en scheursnelheid. Voor wat betreft de permanente deformatie is er geen duidelijke relatie met de verdichtingstemperatuur gevonden. De resultaten geven geen duidelijk relatie en de resultaten variëren binnen een plaat relatief veel.

Naast het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn er nog twee opvallende onderwerpen beschouwd. Na het maken van een aantal platen is gebleken dat er een duidelijk elastisch effect is te zien bij de proefstukken gemaakt met Freundl plaatverdichter; terwijl de Freundl plaatverdichter de platen tot 80 mm had verdicht, bleken de proefstukken 81,5-82,5 mm. Uit metingen is gebleken dat het elastisch effect na 23 uur gelijk is aan het effect na 110 uur, dus wordt verondersteld dat na 23 uur de elastische terugvering van de asfaltplaat beëindigd is. Verder is geconcludeerd dat het elastisch effect bij hoge temperaturen groter is dan bij lage verdichtingstemperaturen en dus is de grootte van het elastisch effect afhankelijk van de verdichtingstemperatuur. Dit kan verklaard worden met behulp van het eerder beschreven reologische gedragsmodel van Krass (hoofdstuk theorie) en de daarbij horende vervormings- en relaxatiekromme en de schets van het verdichtingsmechanisme bij gemodificeerde bitumen ontwikkeld door Ooms (bijlage 2.1). Het verdichtingsmechanisme ontwikkeld door Ooms (appendix 3.1) laat alleen een elastisch effect zien (bouncing effect) bij gemodificeerde bitumen, maar uit de resultaten van dit onderzoek is te zien dat ook bij penetratiebitumen een elastisch effect te zien is.

Verder is er onderzocht of er een verschil zit in de textuur bij de verschillende verdichtingstemperaturen. Uit deze analyse is geconcludeerd dat er meer 'open textuur' aanwezig is bij proefstukken verdicht bij hoge verdichtingstemperaturen (160 °C en hoger) en lage verdichtingstemperaturen (90 °C en lager) dan bij normale verdichtingstemperaturen (130-140 °C).

Verder is de spreiding van de belangrijkste variabelen (dichtheid, temperatuur en de bitumen) zijn voor de positie en kracht gestuurde verdichting geanalyseerd. Deze analyse is weergegeven in de appendix (in bijlage 4.4, deel 2 en 3). Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen, de dichtheid niet meer dan 10 kg/m³ verschilt ten opzichte van de gemiddelde dichtheid, de temperatuur niet meer dan 10 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde temperatuur binnen de plaat, dat de penetratie niet meer dan 4,0 dmm verschilt ten opzichte van de gemiddelde penetratie en de ring&kogel-waarde niet meer dan 1,0 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde ring&kogel-waarde. Uit deze analyse is geconcludeerd dat de spreiding van de variabelen binnen deze doelen vallen.

Nu is onder gecontroleerde omstandigheden onderzocht wat het effect van verschillende verdichtingstemperaturen op de dichtheid en de mechanische eigenschappen is. Nu is het de vraag of deze resultaten in de praktijk ook geldig zijn. In de volgende paragraaf is daarom ingegaan op de praktijkmeting.

3.3 Praktijkmeting

In deze paragraaf zijn de belangrijkste resultaten en conclusies van de praktijkmeting weergegeven en geanalyseerd. In de appendix is het uitgebreide rapport van de praktijkmeting met alle bevindingen weergegeven.

3.3.1 Doel en concept praktijkmeting

Het is de vraag in hoeverre de verdichting in het laboratorium de verdichting in de praktijk simuleert om de conclusies uit het laboratorium geldig te maken in de praktijk. In dit onderzoek is ervoor gekozen om te verifiëren of het effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen als fenomeen ook in de praktijk voorkomt. Er vindt dus geen verificatie plaats van aspecten als de precieze walskracht die uitgeoefend wordt, de vraag of de verschillende walsfasen (voorverdichting, hoofdverdichting en afwalsen) op een juiste wijze gesimuleerd worden, etc. Het doel van deze praktijkcase is dus het toetsen van de resultaten uit het laboratorium, oftewel komt het fenomeen, dat asfaltmengsels verdicht bij verschillende verdichtingstemperaturen andere mechanische eigenschappen behalen ongeacht dat de streefdichtheid wordt behaald, in de praktijk ook voor.

De praktijkmeting betreft een werk in Dirkshorn. Bij een loods zijn er drie banen van 80 m lang, 4,5 m breed met 8 cm dik STAB 0/16 mengsel (zonder PR) aangebracht, ongeveer 230 ton asfalt. De nacht voor de uitvoering en tijdens de uitvoering heeft het enorm geregend, dus de weersomstandigheden waren zeer slecht. Bij de eerste baan is begonnen met verdichten bij 130 °C, bij de tweede baan bij 110 °C en de derde baan bij 90 °C.

Er zijn een tweetal aspecten die het direct vergelijken van de praktijkmeting met de resultaten in het laboratorium bemoeilijken. Ten eerste was het mengsel van de praktijkmeting een stuk grover dan het mengsel dat in het laboratorium is beproefd. Daarnaast was door het slechte weer de ondergrond volledig verzadigd en er waren plassen, waardoor het klankbord verschillend was. Hierdoor is het moeilijk om de resultaten van de praktijkmeting direct te kunnen vergelijken met de resultaten uit het laboratorium, maar wel zijn deze aspecten voor de drie banen hetzelfde, dus een onderling vergelijk om te onderzoeken of het fenomeen ook in de praktijk voorkomt is wel te doen.

3.3.2 Resultaten praktijkmeting

De resultaten van de praktijkmeting zijn onderverdeeld in (1) de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het gehele proces, (2) de verdichting en de behaalde dichtheid en (3) de behaalde mechanische eigenschappen.

3.3.2.1 *Temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verwerking*

Tijdens het gehele verwerkingsproces is de temperatuur van het asfaltmengsel gemeten; bij de asfaltmolen, de temperatuur van het asfaltmengsel wanneer de vrachtwagen het asfaltmengsel in de hopper lost, de temperatuur van het asfalt achter de spreidmachine en in het midden van de werkvakken zijn thermokoppels geplaatst om de afkoeling in de loop van de tijd te meten. Deze metingen zijn achtereenvolgens beschouwd.

Het asfaltmengsel bij de asfaltmolen is gemengd met een zogenaamd discontinue systeem, oftewel een chargemenger. De totale hoeveelheid asfaltmengsel is gemengd in 69 charges met een gemiddelde temperatuur van 161 °C gemeten door een infraroodcamera.

Vervolgens is het asfaltmengsel getransporteerd naar de bouwplaats. De afstand tussen de asfaltmolen en de bouwplaats is 8 km en ongeveer 10-15 minuten rijden. De temperatuur van het asfaltmengsel is gemeten op het moment dat de vrachtwagen het mengsel in de hopper lost gemeten met een infraroodpistool. De gemiddelde gemeten temperatuur op dat moment van vak 1 is 165 °C, van vak 2 is 157 °C en van vak 3 is 156 °C.

Vervolgens is de temperatuur achter de spreidmachine gemeten met een Linescanner. Het resultaat is een overzicht van de oppervlaktetemperatuur over de gehele lengte van de verschillende werkvakken in de vorm van thermografiebeelden. Daarnaast zijn over elke 10 strekkende meter een drietal temperatuurmetingen uitgevoerd met een digitale thermometer om inzicht te krijgen in de gemiddelde temperatuur van het asfalt. Hieruit is geconcludeerd dat de eerste paar vrachten vrij koud waren (135 °C) en dat de stopplaatsen van de spreidmachine duidelijk te zien zijn. Tijdens de stopplaatsen koelt het asfalt af tot 135 °C a 140°C (i.p.v. 165 °C).

Verder zijn in het midden van de werkbakken thermokoppels aangebracht om de afkoeling in de verticale richting van het asfalt in de loop van de tijd te meten. Hieruit is geconcludeerd dat de regen een grote invloed heeft op de oppervlaktetemperatuur. Daarnaast komt de Pavecool-simulatie het meest overeen met de temperatuur in de onderste centimeter van de asfaltlaag.

Er is geconcludeerd dat de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het proces redelijk homogeen is, met uitzondering van de regen en stopplaatsen van de spreidmachine. Verder is geconcludeerd dat het gelukt is om de verschillende banen bij de beoogde verdichtingstemperaturen (130 °C, 110 °C en 90 °C) te beginnen met verdichten. Ook is op basis van de temperatuurmetingen met de thermokoppels in de verticale richting van het asfalt geconcludeerd dat het midden en de onderkant van de asfaltlaag een redelijk homogene temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de loop van de tijd hebben. De oppervlaktetemperatuur is af en toe sterk gedaald door de regen.

3.3.2.2 Verdichting en dichtheid

Voor het verdichten van het asfalt bij de praktijkmeting in Dirkshorn is een combiwals (banden aan de voorkant en statische walsrol aan de achterkant) en een kleine tandemwals gebruikt (figuur 3.13 en figuur 3.14). Het principe is dat de combiwals de 'bulkverdichting' doet en dat de kleine tandemwals de naden walst en tussen de kolken walst. De combiwals heeft een gewicht van 10.400 kg, een last van 26,3 kg/cm en de banden hebben een walsrolkarakteristiek (volgens VBW-asfalt, formule 2.2) van 25,2 en de statische walsrol heeft een walsrolkarakteristiek van 20,6. De kleine tandemwals heeft een gewicht van 2900 kg, een last van 10,5 kg/cm en een walsrolkarakteristiek van 22,8.



Figuur 3.13: Combiwals



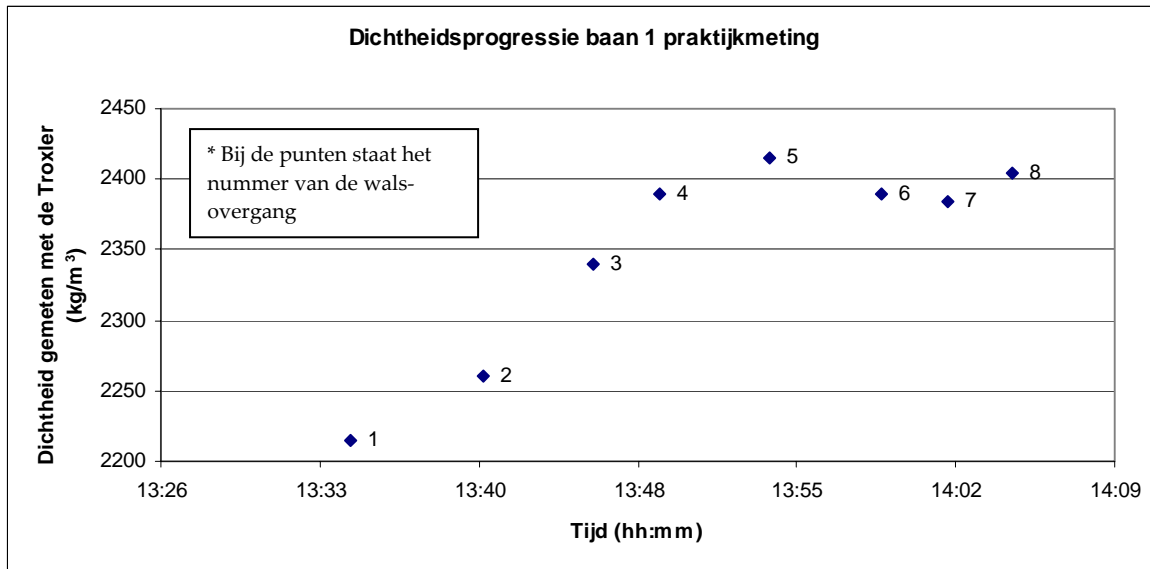
Figuur 3.14: Kleine tandemwals

Om het verdichtingsproces in beeld te brengen is GPS-apparatuur op de walsen aangebracht om de verplaatsingen van de wals te kunnen analyseren. Hieruit blijkt dat de drie banen vrij homogeen gewalst zijn met 8-10 walsovergangen per baan.

Voor wat betreft de walsenergie geldt dat er meer energie nodig is om de streefdichtheid te behalen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Bij baan 1 is na 3 walsovergangen de streefdichtheid al behaald, bij baan 2 na 12 walsovergangen en bij baan 3 wordt met moeite een dichtheid van 2310 kg/m³ behaald, hetgeen nog wel binnen de marges van de streefdichtheid valt. Hieruit blijkt dat verdichtingstemperatuur van belang is voor de verdichtingsenergie die nodig om de streefdichtheid te behalen.

Tijdens het verdichtingsproces is opgevallen dat de nucleaire dichtheid (gemeten met de Troxler) eerst toeneemt, daarna weer afneemt en uiteindelijk weer toeneemt. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 3.15, de dichtheidsprogressie van baan 1 van de praktijkmeting. Eerst neemt de dichtheid toe tot 2410 kg/m³, daarna neemt de dichtheid weer af tot 2390 kg/m³ en vervolgens neemt de dichtheid weer toe tot iets meer dan 2400 kg/m³. Bij de andere banen in de praktijkmeting is deze trend ook

zichtbaar. De verwachte oorzaak hiervan is het elastisch effect van asfalt; wanneer het asfalt terugveert, neemt de dichtheid af.



Figuur 3.15: Dichtheidsprogressie baan 1 praktijkmeting

De volgende ochtend na de uitvoering zijn er asfaltkernen geboord. Per baan zijn er zeven series van 2 kernen vlakbij elkaar (dus gepaard) geboord. Er is in het midden van de banen (in lengte en in breedte) geboord om een representatieve meting te doen en geen effecten van de zijkant te hebben. In figuur 3.16 is weergegeven waar de asfaltkernen zijn geboord.

Boorprocedure

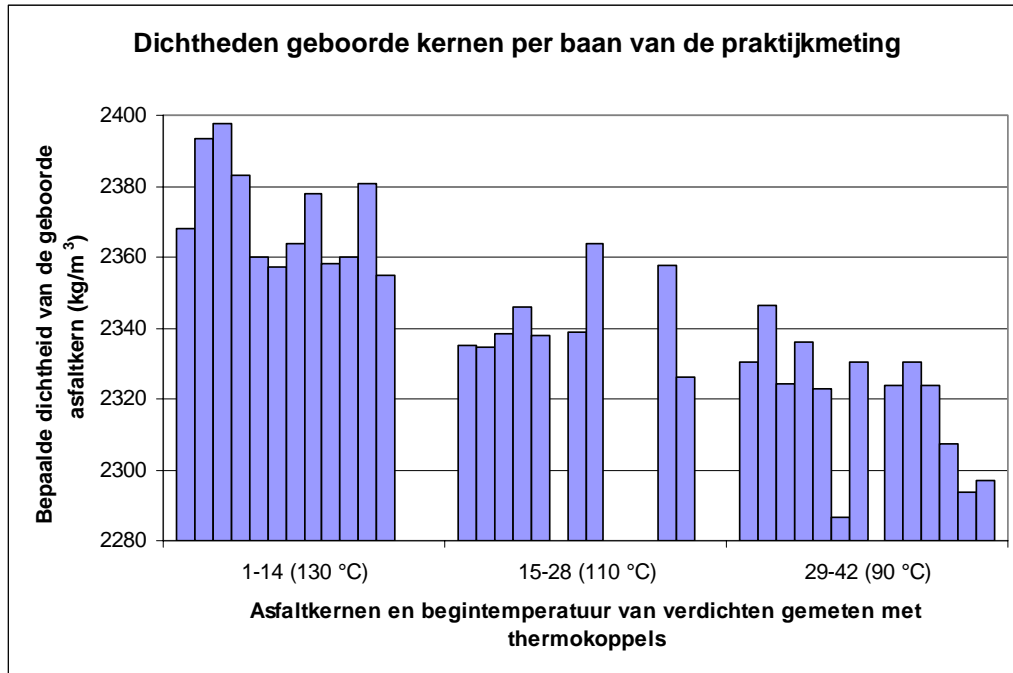
Vak 1: 130 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 2: 110 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 3: 90 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 4: Afwerkvak (5,5m)	niet gemeten						

Legenda:
 ■ Kolken
 • Boorplaats

Figuur 3.16: Plaatsing boren asfaltkernen praktijkmeting

In figuur 3.17 zijn de bepaalde dichtheden van de geboorde kernen weergegeven. Een aantal kernen is uit de analyse gehaald, omdat onvoldoende laagdikte was behaald om te slijpen en vervolgens de beoogde laagdikte te behalen voor de mechanische proef (splijtproef). In figuur 3.15 is voor dit mengsel een duidelijke trend te zien; des te lager de temperatuur bij aanvang van verdichten, des te moeilijker het is om de streefdichtheid (2339 kg/m³) te behalen. Drie kernen uit baan 3 vallen daarmee buiten de marges van de dichtheid (plus of min 30 kg/m³ ten opzichte van de streefdichtheid).

Uit deze analyse is geconcludeerd dat bij een lagere verdichtingstemperatuur het moeilijker wordt om de streefdichtheid te behalen, maar dat het in de praktijk nog steeds mogelijk is om de streefdichtheid te behalen wanneer begonnen wordt met verdichten bij een temperatuur van 90 °C.



Figuur 3.17: Dichtheden kernen per baan praktijkmeting

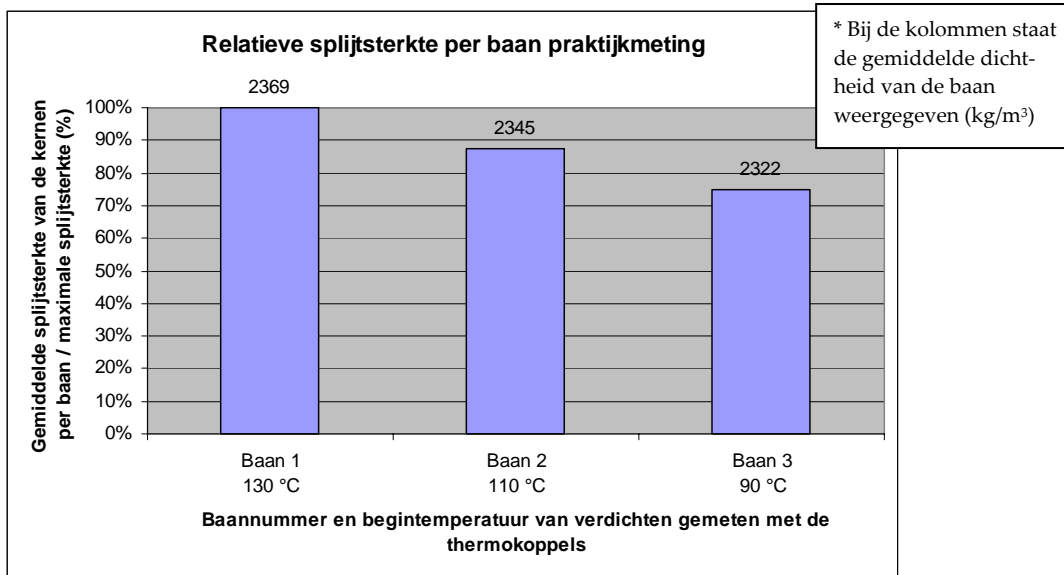
Verder blijkt uit de metingen blijkt dat de nucleaire dichtheid gemeten tijdens het proces structureel hoger is dan de bepaalde dichtheid in het laboratorium. Dit komt overeen met de bevindingen van Ter Huerne (2004). Gemiddeld is de nucleaire dichtheid 45 kg/m^3 hoger dan de bepaalde dichtheid.

3.3.2.3 Mechanische eigenschappen

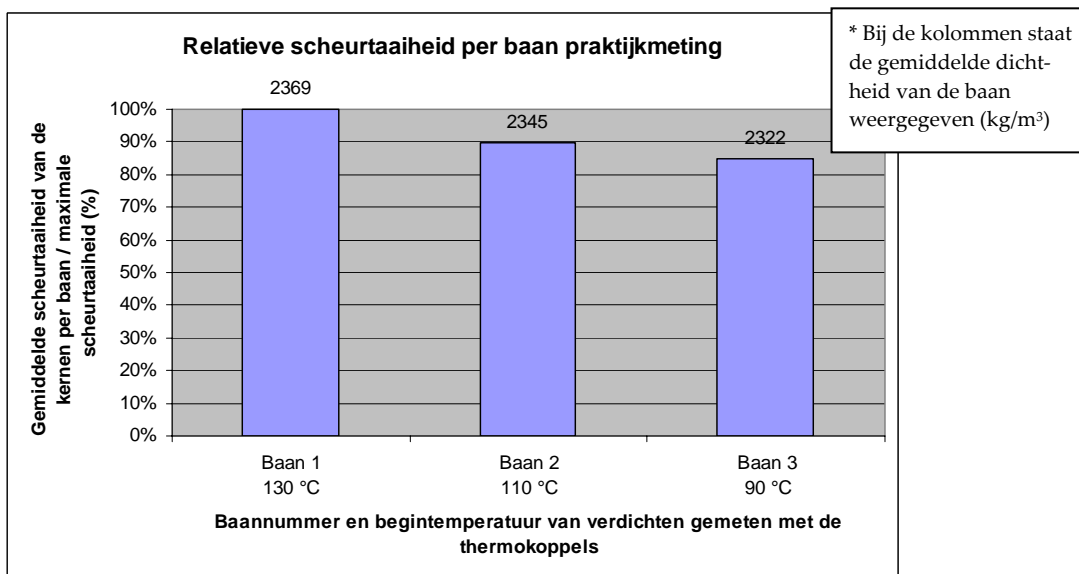
Omdat het verschil in scheurweerstand in het laboratorium tussen de verschillende verdichtingstemperaturen het duidelijkst naar voren is gekomen, zijn er in deze praktijkmeting alleen slijtproeven uitgevoerd om de mechanische kwaliteit te bepalen. Van deze slijtproeven zijn wederom een drietal aspecten zijn vergeleken; de slijtsterkte, de scheurtaaiheid en de daarbij horende scheursnelheid.

In figuur 3.18 is de relatieve slijtsterkte per baan van de praktijkmeting weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de slijtsterkte afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid van de banen gelijk gehouden wordt (dus de kernen met een lage dichtheid van baan 1 en kernen met een hoge dichtheid van baan 2 worden vergeleken), blijkt dat tussen baan 1 en 2 geen verschil in slijtsterkte meer bestaat. Tussen baan 2 en baan 3 blijft het verschil in slijtsterkte aanwezig. Het verschil in slijtsterkte tussen baan 1 en 2 kan dus verklaard worden door het verschil in dichtheid, maar het verschil in slijtsterkte tussen baan 2 en 3 kan verklaard worden door de verdichtingstemperatuur.

In figuur 3.19 is de relatieve scheurtaaiheid per baan van de praktijkmeting weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de scheurtaaiheid afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid van de banen gelijk gehouden wordt, is te zien dat de verschillen in scheurtaaiheid gelijk blijven. Deze verschillen in scheurtaaiheid kunnen dus verklaard worden door het verschil in verdichtingstemperatuur. Een verschil in dichtheid van 2369 kg/m^3 tot 2322 kg/m^3 heeft dus geen effect op de scheurtaaiheid.

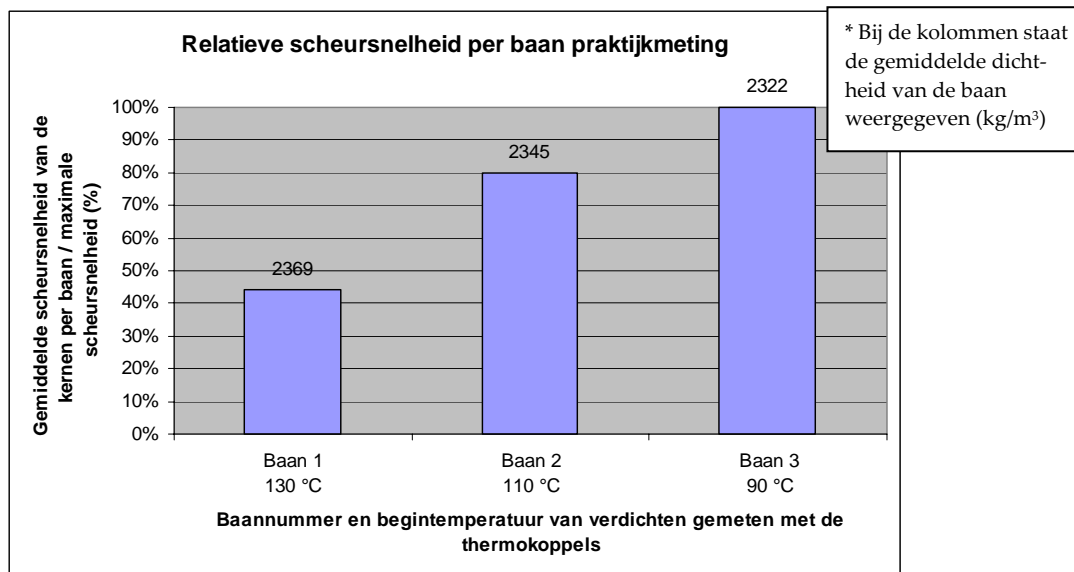


Figuur 3.18: Relatieve splijtsterkte per baan praktijkmeting



Figuur 3.19: Relatieve scheurtaaiheid per baan praktijkmeting

In figuur 3.20 is de relatieve scheursnelheid per baan van de praktijkmeting weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de scheursnelheid toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid van de banen gelijk gehouden wordt, is te zien dat het verschil in scheursnelheid tussen baan 1 en baan 2 kleiner wordt, maar nog steeds aanwezig blijft en het verschil tussen baan 2 en baan 3 ongeveer gelijk blijft. Dit betekent dat het verschil in scheurtaaiheid tussen baan 1 en 2 voor een deel verklaard kan worden door de dichtheid en voor een deel door de verdichtingstemperatuur. Het verschil in scheursnelheid tussen baan 2 en 3 kan volledig worden verklaard door de verdichtingstemperatuur.



Figuur 3.20: Relatieve scheursnelheid per baan praktijkmeting

Ook bij de praktijkmeting is er onderzocht of er een verschil zit in de textuur bij de verschillende verdichtingstemperaturen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er, net als in het laboratorium, meer 'open textuur' aanwezig is bij proefstukken verdicht bij de lagere verdichtingstemperaturen (110 °C en 90 °C) dan bij de normale verdichtingstemperatuur (130 °C).

3.3.3 Conclusies praktijkmeting

Achtereenvolgens zijn de belangrijkste resultaten van de praktijkmeting in Dirkshorn met betrekking tot (1) de temperatuur, (2) de verdichting en de dichtheid en (3) de mechanische eigenschappen besproken op basis van de sub-onderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2.5:

Hoe is de temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de praktijk?

Tijdens het gehele verwerkingsproces is de temperatuur van het asfaltmengsel gemeten. Bij de asfaltmolen was de gemiddelde temperatuur van de charges 161 °C en in de hopper van de spreidmachine was de temperatuur 155 °C tot 165 °C (gemeten met infraroodcamera's). Achter de balk was de gemiddelde temperatuur ongeveer 155 °C, gemeten met een digitale thermometer) met uitzondering van aantal stopplaatsen. Bij deze stopplaatsen is de temperatuur gezakt tot 135 °C a 140 °C.

Om de afkoeling in de loop van de tijd over de gehele asfaltdikte te meten zijn thermokoppels aangebracht in het midden en de onderkant van de asfaltlaag en de oppervlaktetemperatuur is gemeten met een warmtebeeldcamera. Uit deze metingen kan geconcludeerd worden dat de het effect van regen een grote invloed heeft op de oppervlaktetemperatuur. Het effect van deze relatief koude oppervlaktetemperatuur en warme onderlaag is onbekend en aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar te doen.

Er is geconcludeerd dat de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het proces redelijk homogeen is, met uitzondering van de regen en stopplaatsen van de spreidmachine. De oppervlaktetemperatuur is af en toe sterk gedaald door de regen. Verder is op basis van de temperatuurmetingen met de thermokoppels in de verticale richting van het asfalt geconcludeerd dat het midden en de onderkant van de asfaltlaag een redelijk homogene temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de loop van de tijd hebben.

Onderzoeksvraag 2.2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie in de praktijk?

Uit de walsbewegingen zijn de taken en verantwoordelijkheden van de verschillende walsen duidelijk zichtbaar. De combiwals is verantwoordelijk voor de grote bulkverdichting en de kleine wals walst de naden, bochten en tussen kolken etc. De combiwals heeft een gewicht van 10.400 kg, een last van 26,3 kg/cm en de banden hebben een walsrolkarakteristiek (volgens VBW-asfalt, formule 2.2) van 25,2 en de statische walsrol heeft een walsrolkarakteristiek van 20,6. De kleine tandemwals heeft een gewicht van 2900 kg, een last van 10,5 kg/cm en een walsrolkarakteristiek van 22,8.

De verdichtingskracht is in de praktijk afhankelijk van het aantal walsovergangen. Voor wat betreft de verdichtingskracht geldt dat er meer kracht nodig is om de streefdichtheid te behalen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Bij baan 1 is na 3 walsovergangen de streefdichtheid al behaald, bij baan 2 na 12 walsovergangen en bij baan 3 wordt met moeite de streefdichtheid behaald.

De verdichtingsenergie is afhankelijk van de dichtheidsprogressie. Voor wat betreft de verdichtingsenergie geldt dat er meer energie nodig is om de streefdichtheid te behalen naarmate de verdichtingstemperatuur omlaag gaat. Het wordt dus steeds moeilijker om de dichtheid te verbeteren als de temperatuur van het asfaltmengsel relatief laag is.

Verder is de dichtheidsprogressie gemeten na elke walsovergang waaruit geconcludeerd kan worden dat de dichtheid eerst toeneemt, daarna weer afneemt en uiteindelijk weer toeneemt. De verwachte oorzaak hiervan is het elastisch effect van asfalt; wanneer het asfalt terugveert, neemt de dichtheid af.

Onderzoeksvraag 2.4:

Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen in de praktijk?

Aan de hand van de dichtheden kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de beoogde dichtheid behaald kan worden. Wel vallen de dichtheden van alle banen binnen de marges van de streefdichtheid, dus tot een temperatuur van 90 °C bij het begin van de verdichting is de dichtheid haalbaar.

Verder is de nucleair gemeten dichtheid (tijdens de uitvoering) vergeleken met de bepaalde dichtheid (onder en boven water wegen van de geboorde kernen) waaruit geconcludeerd kan worden dat de nucleaire dichtheid structureel hoger is dan de bepaalde dichtheid. Gemiddeld is de nucleaire dichtheid 45 kg/m³ hoger dan de bepaalde dichtheid.

Onderzoeksvraag 3.2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen in de praktijk?

Omdat het verschil in scheurweerstand in het laboratorium tussen de verschillende verdichtingstemperaturen het duidelijkst naar voren is gekomen, zijn er in de praktijkmeting alleen splijtproeven uitgevoerd om de mechanische kwaliteit te bepalen. Hieruit is geconcludeerd dat de splijtsterkte afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Hierbij kan het verschil in splijtsterkte tussen baan 1 (150 °C) en 2 (130 °C) verklaard worden door het verschil in dichtheid en het verschil in splijtsterkte tussen baan 2 (130 °C) en 3 (100 °C) kan verklaard worden door de verdichtingstemperatuur.

Voor wat betreft de scheurtaaiheid is geconcludeerd dat de scheurtaaiheid afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid van de banen gelijk gehouden wordt, is te zien dat de verschillen in scheurtaaiheid gelijk blijven. De verschillen in scheurtaaiheid kunnen dus verklaard worden door het verschil in verdichtingstemperatuur. Een verschil in dichtheid van 2369 kg/m³ tot 2322 kg/m³ heeft dus geen effect op de scheurtaaiheid.

Verder is geconcludeerd dat de scheursnelheid toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Het verschil in scheursnelheid tussen baan 1 (150 °C) en 2 (130 °C) kan voor een deel verklaard kan worden door de dichtheid en voor een deel door de verdichtingstemperatuur. Het verschil in scheursnelheid tussen baan 2 (130 °C) en 3 (100 °C) kan volledig worden verklaard door de verdichtingstemperatuur.

Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat het fenomeen dat in het laboratorium is gevonden, dat de mechanische eigenschappen verschillen door een andere verdichtingstemperatuur, ondanks dat de streefdichtheid behaald is, ook in de praktijk voorkomt.

Voor het doen van een volgende praktijkmeting worden nog een aantal aanbevelingen gedaan. Een ideale praktijkmeting vindt plaats onder betere omstandigheden, in ieder geval zonder neerslag. Daarnaast is het van belang om een goed en homogeen klankbord te krijgen. Dit kan bereikt worden door een tussenlaag als te onderzoeken mengsel te kiezen. Verder wordt aangeraden om bij een volgende praktijkmeting te focussen op één of twee aspecten, zodat alle andere variabelen zo goed mogelijk gelijk gehouden kunnen worden.

Nu het effect van de verdichtingstemperatuur op de dichtheid en de mechanische eigenschappen, in het laboratorium en in de praktijk, is bepaald, kunnen deze resultaten met elkaar worden vergeleken. Deze vergelijking tussen de resultaten gevonden in het laboratorium en in de praktijk is in de volgende paragraaf beschreven.

3.4 Vergelijking laboratoriumonderzoeken en praktijkmeting

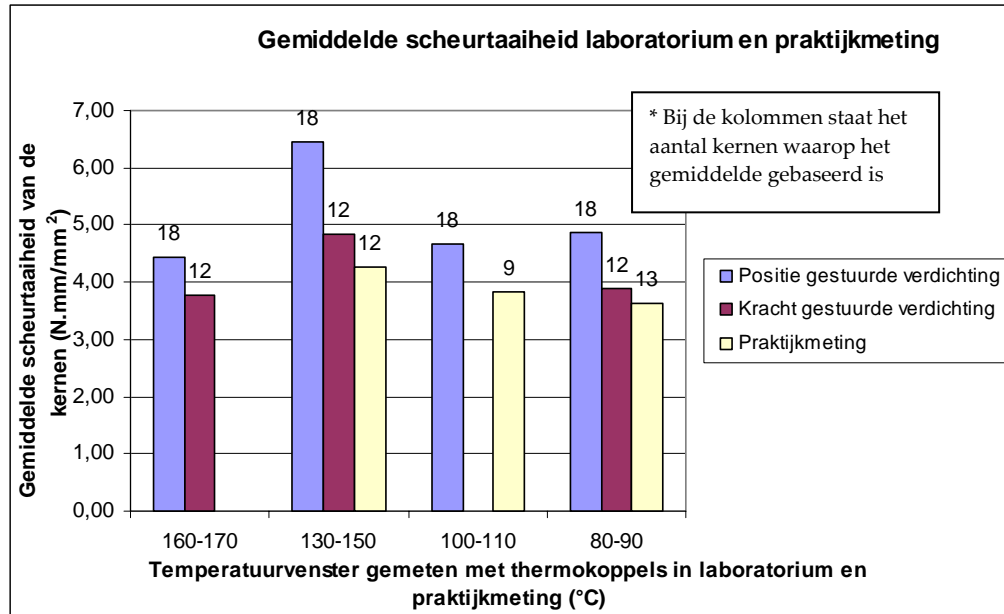
Het laboratoriumonderzoek heeft inzicht gegeven in de mechanische eigenschappen bij verschillende verdichtingstemperaturen. De praktijkmeting bevestigt deze resultaten. Vervolgens zijn in deze paragraaf de twee verdichtingsprocedures uit het laboratorium met de praktijkmeting vergeleken. De verschillen tussen de resultaten uit het laboratorium en de praktijkmeting hebben een tweetal oorzaken; ten eerste zijn in het laboratorium ideale omstandigheden (een stijve onderlaag, goede opsluiting, geen regen, etc.) en de metingen in de praktijk zijn onder minder ideale omstandigheden gedaan en ten tweede is er in het laboratorium meer verdichtingsenergie uitgeoefend dan in de praktijkmeting. Ten eerste is ingegaan op de behaalde dichtheden en daarna zijn de behaalde mechanische eigenschappen vergeleken.

Voor wat betreft de behaalde dichtheden is het opvallend dat tegengestelde trends zichtbaar zijn; in het laboratorium leidt een lagere verdichtingstemperatuur tot een hogere dichtheid en in de praktijk leidt een lagere verdichtingstemperatuur tot een lagere dichtheid. De hoge dichtheden bij lage verdichtingstemperaturen in het laboratorium kunnen verklaard worden door de stijve onderlaag en de goede opsluiting van het proefstuk. Verder valt op dat bij de normaal gebruikte verdichtingstemperaturen (130-150 °C) de overeenkomst tussen het laboratorium en de praktijk het grootst is en hoe lager de verdichtingstemperatuur, hoe groter het verschil tussen de dichtheid in het laboratorium en de dichtheid in de praktijk.

Bij de splijtsterkte valt op dat de splijtsterkte in het laboratorium structureel hoger is dan de splijtsterkte uit de praktijkmeting. Dit verschil kan verklaard worden door de minder gunstige omstandigheden in de praktijkmeting. Wederom valt op dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te groter het verschil tussen het laboratorium en de praktijk.

Betreffende de scheurtaaiheid en de scheursnelheid geldt dat de scheurtaaiheden in het laboratorium structureel hoger liggen (zie figuur 3.21) en dus liggen de scheursnelheden in het laboratorium structureel lager. Dit is logisch, omdat de omstandigheden in het laboratorium beter zijn dan in bij de praktijkmeting, qua ondergrond, opsluiting, etc. Ook hierbij valt op dat het verschil tussen het laboratorium en de praktijk groter wordt bij de lagere verdichtingstemperaturen. Daarnaast wordt geconclu-

deerd dat de kracht gestuurde verdichting in het laboratorium bij alle onderzochte verdichtingstemperaturen de scheurtaaiheid en scheursnelheid in de praktijk een stuk nauwkeuriger voorspelt dan de positie gestuurde verdichting. Een mogelijke verklaring hiervoor is de grote hoeveelheid verdichtingsenergie die gebruikt wordt om positie gestuurd te verdichten, hetgeen in de praktijk nauwelijks haalbaar is.



Figuur 3.21: Scheurtaaiheid positie- en kracht gestuurde verdichting en praktijkmeting

Resumé: Er is geconcludeerd dat de dichtheid in het laboratorium bij de normale verdichtingstemperaturen (130-150 °C) de dichtheid in de praktijk vrij goed voorspeld. Hoe lager de verdichtingstemperatuur wordt, hoe minder nauwkeurig de dichtheden in het laboratorium zijn. Verder is geconcludeerd dat de mechanische eigenschappen in het laboratorium structureel beter zijn dan in de praktijk en hoe lager de verdichtingstemperatuur wordt, hoe groter dit verschil met de praktijk wordt. Deze verschillen kunnen verklaard worden door de minder ideale omstandigheden in de praktijk, zoals een minder stijve ondergrond en regen tijdens de uitvoering. Daarnaast is geconcludeerd dat de kracht gestuurde verdichting de metingen uit de praktijk structureel beter benadert dan de positie gestuurde verdichting. Dit kan verklaard worden door een meer realistisch gekozen verdichtingskracht die vergelijkbaar is met de praktijk.

Aan de hand van de voorgaande paragrafen is inzicht verkregen in het effect van de verdichtingstemperatuur op de verdichtingsenergie, de dichtheid en de mechanische eigenschappen. Aan de hand hiervan kunnen de onderzoeksvragen 2 en 3 beantwoord worden, hetgeen in de volgende paragraaf gedaan is.

3.5 Conclusies empirische onderzoeken

Het doel van het empirisch onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de verdichtingsenergie, de dichtheid en de mechanische eigenschappen. Het empirisch onderzoek is gedaan door middel van laboratoriumexperimenten en het doen van metingen in de praktijk. De conclusies van het empirisch onderzoek zijn geschreven aan de hand van de onderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingsenergie en de dichtheid?

Uit de laboratoriumresultaten en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie toenemen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen meer viskeus zijn en er daarmee meer kracht en energie nodig is om te verdichten. Bij verdichtingstemperaturen lager dan 100 °C is wel gebleken, zowel in het laboratorium als in de praktijkmeting, dat het moeilijk is om de dichtheid te behalen en bij verdichtingstemperaturen hoger dan 150 °C dient er rekening mee worden gehouden dat er minder kracht nodig is om te verdichten en dus evt. met een lichtere wals verdicht moet worden of dat er nog gewacht moet worden met verdichten. Verder lijkt het in het laboratorium met de Freundl plaatverdichter tot hele lage verdichtingstemperaturen nog haalbaar om de streefdichtheid te behalen, zelfs bij temperaturen die met een wals in de praktijk niet haalbaar zijn.

Verder dient er mee rekening te worden gehouden dat er een terugveereffect tijdens het verdichten plaatsvindt, en dus een afname van de dichtheid. Wanneer dit effect plaatsvindt is onder andere afhankelijk van de verdichtingstemperatuur.

Aan de hand van de dichtheden uit het laboratorium en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de streefdichtheid behaald kan worden. Desalniettemin is het mogelijk om de streefdichtheid te behalen (binnen de marges) door bij een temperatuur van 90 °C te beginnen met de verdichting.

Verder dient er in de praktijk rekening gehouden te worden dat de nucleaire dichtheidsmetingen structureel hoger zijn dan werkelijke dichtheden. Dit komt overeen met de bevindingen van Ter Huerne (2004).

VBW-asfalt (2003) concludeert verder dat, in de range van de boven- en ondergrens, een hogere temperatuur tot een betere verdichting leidt en Van der Velden (2003) concludeert dat hoe lager de temperatuur hoe beter het mengsel te verdichten is. Op basis dit onderzoek is geconcludeerd dat het niet gaat om een hogere of lagere temperatuur, maar dat het om een temperatuurgebied gaat. Wel is geconcludeerd dat bij een hogere verdichtingstemperatuur minder energie nodig is om te verdichten, maar dat wil niet per definitie zeggen dat het mengsel beter verwerkbaar is.

Onderzoeksvraag 3:

Wat zijn de mechanische consequenties van het verdichten bij verschillende verdichtingstemperaturen?

Om de mechanische eigenschappen te bepalen zijn slijt- en triaxiaalproeven gedaan. Aan de hand van de resultaten uit het laboratorium en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat, ondanks dat de streefdichtheid behaald kan worden door te beginnen met verdichten bij 90 °C, er een groot verschil in scheurtaaiheid en scheursnelheid tussen de verdichtingstemperaturen zichtbaar is. Beginnen met verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Deze resultaten bevestigen ook het onderzoek van Recansens et al (2000) die concluderen dat de slijtsterkte en de scheurtaaiheid efficiëntere parameters zijn om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten. Tussen de permanente deformatie en de verdichtingstemperatuur is er geen duidelijke relatie gevonden.

In het empirisch onderzoek is het effect van de verdichtingstemperatuur op de verdichtingsenergie, de dichtheid en de mechanische eigenschappen bepaald. Deze resultaten vormen het uitgangspunt voor het temperatuur- en tijdsvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR). Op dit temperatuur- en tijdsvenster is in de volgende paragraaf ingegaan.

4 Analyse temperatuur- en tijdsvenster van het onderzochte mengsel

Het doel van de analyse is het bepalen van het temperatuur en tijdsvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) op basis van de resultaten uit het empirisch onderzoek. De analyse van het temperatuur- en tijdsvenster voor het STAB 0/16 mengsel vormt het uitgangspunt voor de procedure. Dit hoofdstuk is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 4.

4.1 Temperatuurvenster van het onderzochte mengsel

Deze paragraaf is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 4.1.

Onderzoeksvraag 4.1

Wat is het temperatuurvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?

Op basis van de resultaten uit het empirisch onderzoek is een temperatuurvenster gedestilleerd op basis van de behaalde mechanische eigenschappen. Het temperatuurvenster van het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) ligt tussen de 140 °C en 150 °C om te beginnen met verdichten. Wanneer eerder (en dus bij een hogere temperatuur) of later (bij een lagere temperatuur) wordt begonnen met verdichten, en volgens de normale verdichtingsprocedure wordt gewerkt en gewerkt blijft worden, is het dus nog wel mogelijk om de streefdichtheid te behalen, maar verslechteren de eigenschappen scheurtaaiheid en scheursnelheid.

Volgens VBW-asfalt (2003) en Ooms (bijlage 2.1) is het tot 60 °C nog effectief om te verdichten. Bij een lagere temperatuur kan er geen verdichtingsprogressie meer bereikt worden en kunnen walsafdrukken en andere onregelmatigheden niet tot moeilijk weggewerkt worden.

Dit betekent dat het temperatuurvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) waarbinnen de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt van 150-140 °C tot 60 °C loopt.

4.2 Tijdsvenster van het onderzochte mengsel

Deze paragraaf is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 4.2.

Onderzoeksvraag 4.2

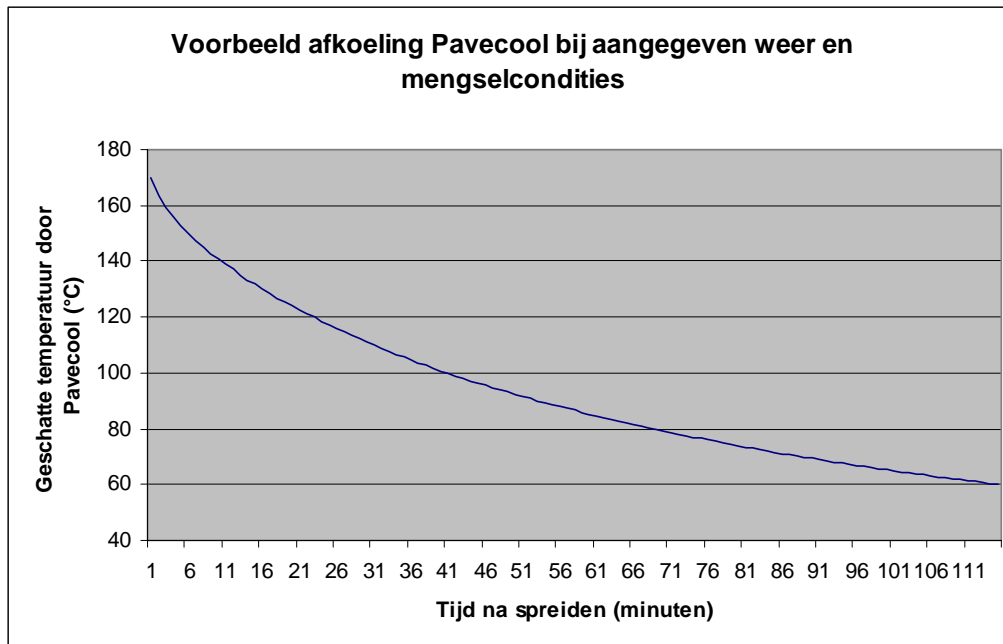
Wat is het tijdsvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?

Uit de praktijkstudie is gebleken dat Pavecool de werkelijke afkoeling van het asfaltmengsel vrij nauwkeurig kan voorspellen en overeenkomt met de afkoeling van de onderste centimeter van het asfaltmengsel. Daarom is Pavecool gebruikt om op basis van het temperatuurvenster, het tijdsvenster te bepalen. Afhankelijk van de invoerparameters (ondergrond, weersomstandigheden, etc.), en dus de snelheid van afkoelen, kan het tijdsvenster met Pavecool worden bepaald op basis van het temperatuurvenster. Er is één voorbeeld uitgewerkt met de invoerparameters weergegeven in figuur 4.1. De invoerparameters zijn aangepast aan een situatie onder relatief slechte omstandigheden, een buitentemperatuur van 5 °C met een windsnelheid van 10 km/h.

Start Date/Time 2-12-2009 1:19 PM Update to Current Time	Mix Specifications Mix Type Coarse/SMA Binder Grade PG 58 :28 Lift Thickness 80 mm Delivery Temperature 170 °C
Environmental Conditions Air Temperature 5 °C Wind Speed 10 km/h Sky Overcast Latitude 52 °N	Existing Surface Material Type Granular Base Material Condition Dry Unfrozen Surface Temperature 5 °C Calculate

Figuur 4.1: Invoerparameters Pavecool

Aan de hand van deze invoerparameters berekent Pavecool de snelheid van afkoeling van het asfaltmengsel. Deze afkoeling in de loop van de tijd is weergegeven in figuur 4.2.



Figuur 4.2: Voorbeeld afkoelingscurve Pavecoool

Op basis van het temperatuurvenster dat loopt van 150-140 °C tot 60 °C kan dus afgelezen worden dat, voor deze omstandigheden, het tijdsvenster om te verdichten van 5-10 minuten na spreiden tot 115 minuten na spreiden loopt.

Wanneer eerder dan 5 minuten na spreiden of later dan 5 minuten na spreiden wordt begonnen met verdichten, en volgens de normale verdichtingsprocedure wordt gewerkt en gewerkt blijft worden, is het dus nog wel mogelijk om de streefdichtheid te behalen, maar verslechteren de eigenschappen scheurtaaiheid en scheursnelheid.

Onderzoeksvraag 4:

Wat zijn het temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel?

Het temperatuurvenster voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) loopt van 150-140 °C tot 60 °C. Op een relatief koude dag is vervolgens het tijdsvenster van 5-10 minuten na spreiden tot 115 minuten na spreiden. Wanneer eerder (en dus bij een hogere temperatuur) of later (bij een lagere temperatuur) wordt begonnen met verdichten, en volgens de normale verdichtingsprocedure wordt gewerkt en gewerkt blijft worden, is het dus nog wel mogelijk om de streefdichtheid te behalen, maar verslechteren de eigenschappen scheurtaaiheid en scheursnelheid.

Nu er voor het STAB 0/16 mengsel een temperatuur- en tijdsvenster is bepaald vormt het proces waarop deze vensters zijn bepaald het uitgangspunt voor de algemene procedure om temperatuur en tijdsvenster voor Nederlandse asfaltmengsels te bepalen. In het volgende hoofdstuk is ingegaan op deze procedure, het doel van dit afstudeeronderzoek.

5 Procedure bepaling temperatuur- en tijdsvensters Nederlandse asfaltmengsels

Dit hoofdstuk is geschreven aan de hand van de hoofdonderzoeksvraag en het doel van het gehele onderzoek. Dit hoofdstuk beschrijft een procedure, stappenplan, om temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels te bepalen.

Hoofdonderzoeksvraag:

Volgens welke procedure kunnen temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels worden bepaald?

Het temperatuurvenster is gedefinieerd als die temperaturen waarbij de beoogde verdichtingsprogressie plaatsvindt en de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt. Het tijdsvenster is gedefinieerd als de tijd waarin de maximale temperatuur waarbij de beoogde verdichtingsprogressie plaatsvindt en de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt, afkoelt tot de minimale temperatuur waarbij de beoogde verdichtingsprogressie plaatsvindt en de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt.

De bepaling van het temperatuurvenster kan gedaan worden door het doen van empirisch onderzoek in het laboratorium en in de praktijk. De bepaling van het tijdsvenster op basis van het temperatuurvenster kan goed worden gedaan met behulp van Pavcool, hetgeen een geautomatiseerd model is, zodat het snel toepasbaar is en het model is gevalideerd voor een aantal Nederlandse asfaltmengsels. Om de asfaltmengsels te verdichten is de Freundl walssegmentverdichter goed bruikbaar.

Procedure om temperatuur- en tijdsvensters te bepalen voor Nederlandse asfaltmengsels:

1. Bepaal het asfaltmengsel waar het tijd- en temperatuurvenster voor bepaald moet worden
2. Bepaal de beoogde dichtheid en maatgevende mengseleigenschappen die behaald moeten worden
3. Doe empirisch onderzoek in het laboratorium
 - 3.1. Verdicht het asfaltmengsel positie gestuurd bij verschillende temperaturen met de Freundl plaatverdichter
 - 3.2. Verdicht het asfaltmengsel kracht gestuurd bij verschillende temperaturen met de Freundl plaatverdichter
 - 3.3. Bepaal de maatgevende mechanische eigenschappen bij verschillende temperaturen
4. Doe empirisch onderzoek in de praktijk om de resultaten uit het laboratorium te valideren
 - 4.1. Kies een goede praktijkstudie
 - 4.2. Verdicht het asfaltmengsel volgens een vaste walsprocedure bij verschillende temperaturen
 - 4.3. Boor asfaltkernen op representatieve plaatsen
 - 4.4. Bepaal de maatgevende mechanische eigenschappen bij verschillende temperaturen in het laboratorium
5. Analyseer de resultaten van het empirisch onderzoek en bepaal het temperatuurvenster op basis van de mechanische eigenschappen
6. Bepaal het tijdsvenster met behulp van Pavcool op basis van het gevonden temperatuurvenster

De procedure voor het bepalen van temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels is bruikbaar en de werking en merites van de procedure is aangetoond door het temperatuur- en tijdsvenster voor een STAB 0/16 mengsel (zonder PR) te bepalen.

6 Conclusies en aanbevelingen

In het onderzoeksontwerp is beschreven dat, naast het ontwikkelen van de procedure, het doel is om verbetervoorstellen te doen voor de huidige bouwpraktijk met betrekking tot de temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Deze verbetervoorstellen dienen uitvoerbaar, herhaalbaar en robuust te zijn. Ten eerste zijn de belangrijkste conclusies van dit onderzoek beschouwd, vervolgens worden een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan en uiteindelijk is er toegewerkt naar een aantal verbetervoorstellen.

6.1 Conclusies van het onderzoek

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn onderverdeeld in de drie thema's van dit onderzoek; de temperatuur van het asfaltmengsel, de verdichting en dichtheid, en de mechanische eigenschappen. Uiteindelijk is de eindconclusie van dit onderzoek beschreven.

Temperatuur:

- Belangrijke aandachtspunten bij het meten van de temperatuur van asfalt zijn:
 - De heterogene temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag;
 - De temperatuur bij de asfaltcentrale, de temperatuur tijdens aanbrengen, de temperatuur van de ondergrond, het verwerkingsproces, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte, de dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid, neerslag en zonnewarmte);
 - Belangrijke parameters die de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag beïnvloeden zijn de laagdikte, de buitentemperatuur, de windsnelheid, neerslag en de temperatuur van de ondergrond.
- Om de afkoeling van het asfaltmengsel in de loop van de tijd en de verticale temperatuurverdeling binnen het asfaltmengsel te meten zijn thermokoppels goed bruikbaar.

Verdichting en dichtheid:

- Belangrijke aandachtspunten bij het doen van onderzoek naar de verdichting van asfalt zijn:
 - Het verdichtingsproces vindt plaats in een drietal fasen; (1) voorverdichting met een korreloriëntatie door de balk, (2) hoofdverdichting met de wals en (3) naverdichting om oneffenheden weg te walsen;
 - Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen (o.a. regeneratieasfalt, bitumen(gehalte) en vulstof), de vochtigheidsgraad en de kracht die uitgeoefend wordt;
 - Factoren die van invloed zijn bij de verdichting zijn de stijfheid van de onderlaag, de opsluiting van het asfaltmengsel, de samenstelling van het asfaltmengsel, het type wals en de asfalttemperatuur tijdens de verdichting.
- In de Europese standaard (EN-12697-33) worden een viertal verdichtingsmethoden beschreven; impact verdichting, knedende verdichting, vibrerende verdichting en rollende verdichting. Om de asfaltmengsels te verdichten is de rollende verdichting, de Freundl walssegmentverdichter (WSV-2008-KW50/500), goed bruikbaar;
- Voor het verdichten met de Freundl walssegmentverdichter zijn de verdichtingsprocedures van Mollenhauer (2008) bruikbaar;
- In de Freundl walssegmentverdichter nemen de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie toe naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Volgens VBW-asfalt (2003) geldt in principe dat hoe hoger de temperatuur, hoe beter het mengsel te verdichten is, hetgeen met de resultaten in dit onderzoek overeenkomt;

- Aan de hand van de dichtheden uit het laboratorium en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de streefdichtheid behaald kan worden. Desalniettemin is het mogelijk om de streefdichtheid te behalen (binnen de marges) door bij een temperatuur van 90 °C te beginnen met de verdichting. Bij verdichtingstemperaturen lager dan 100 °C is wel gebleken dat het moeilijk is om de dichtheid te behalen en bij verdichtingstemperaturen hoger dan 150 °C dient er rekening mee worden gehouden dat er minder kracht nodig is om te verdichten en dus evt. met een lichtere wals verdicht moet worden of dat er nog gewacht moet worden met verdichten;
- Verder dient er rekening te worden gehouden dat er een terugveereffect tijdens het verdichten plaatsvindt, en dus een afname van de dichtheid. Wanneer dit effect plaatsvindt en hoe groot dit effect is onder andere afhankelijk van de verdichtingstemperatuur;
- In de praktijk dient rekening gehouden te worden dat de nucleaire dichtheidsmetingen structureel hoger zijn dan de werkelijke dichtheden;
- Daarnaast wordt geconcludeerd dat de kracht gestuurde verdichting van de Freundl walssegmentverdichter in het laboratorium bij alle onderzochte verdichtingstemperaturen de scheurtaaiheid en scheursnelheid in de praktijk een stuk nauwkeuriger voorspelt dan de positie gestuurde verdichting. Verder is geconcludeerd dat de benadering in het laboratorium onnauwkeuriger wordt naarmate de verdichtingstemperatuur omlaag gaat.

Mechanische eigenschappen:

- Bij de positie gestuurde verdichting met de Freundl walssegmentverdichter lijkt er voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR) tussen de splijtsterkte en de verdichtingstemperatuur een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua splijtsterkte tussen de 149 °C en 158 °C die ongeveer 10% meer splijtsterkte behalen. Bij de kracht gestuurde verdichting behalen de hogere verdichtingstemperaturen (166 °C en 169 °C) duidelijk een lagere splijtsterkte (8%);
- Verder is bij beide verdichtingsprocedures voor het STAB 0/16 mengsel (zonder PR), ondanks dat de streefdichtheid is behaald, een groot verschil in scheurtaaiheid en scheursnelheid tussen de verdichtingstemperaturen te zien. Verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Tussen de scheursnelheid en scheurtaaiheid en de dichtheid (in de range van 2330-2400 kg/m³) is bij beide procedures geen relatie gevonden; platen met een hoge dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid en hoge scheursnelheid. Hieruit blijkt dat, voor dit mengsel, de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid en scheursnelheid;
- Voor wat betreft de permanente deformatie is er, voor dit mengsel, geen duidelijke relatie met de verdichtingstemperatuur gevonden. De resultaten geven geen duidelijk relatie en de resultaten variëren binnen een plaat relatief veel.

Eindconclusie:

De ontwikkelde procedure voor het bepalen van temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels is bruikbaar. De werking en merites van de procedure is aangetoond door het temperatuur- en tijdsvenster voor een STAB 0/16 mengsel (zonder PR) te bepalen.

Het temperatuurvenster voor dit mengsel loopt van 150-140 °C tot 60 °C. Theoretisch loopt het tijdsvenster op een relatief koude dag van 5-10 minuten na spreiden om te beginnen met verdichten tot om en nabij anderhalf á twee uur na spreiden om het verdichtingsproces af te ronden. Wanneer eerder (en dus bij een hogere temperatuur) of later (bij een lagere temperatuur) wordt begonnen met verdichten, en volgens de normale verdichtingsprocedure wordt gewerkt en gewerkt blijft worden, is het dus nog wel mogelijk om de streefdichtheid te behalen, maar verslechteren de eigenschappen scheurtaaiheid en scheursnelheid. Verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan voor het STAB 0/16

mengsel (zonder PR) leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Deze kwaliteitsreductie, en dus levensduurverkorting, wordt in de huidige kwaliteitscontrole, waarbij alleen de dichtheid achteraf gecontroleerd wordt, niet gedetecteerd. Het lijkt daarom niet voldoende om alleen de dichtheid (achteraf) te controleren, maar ook de verdichtingstemperatuur tijdens het proces, zodat er ook nog bijgestuurd kan worden tijdens dit proces. Ook zullen achteraf de maatgevende schadebeelden, voor dit mengsel vooral spoor- en scheurvorming, gecontroleerd moeten worden. De verdichtingstemperatuur, de scheurtaaiheid en scheursnelheid lijken, voor dit mengsel, daarmee efficiëntere parameters om de mechanische kwaliteit van het asfalt(mengsel) te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

6.2 Verbetervoorstellen huidige bouwpraktijk

Aan de hand van dit onderzoek kunnen een aantal verbetervoorstellen voor de huidige bouwpraktijk worden gedaan gericht op het temperatuur- en tijdsvenster van verdichten voor Nederlandse asfaltmengsels. In hoofdstuk 7 zijn de conclusies van dit onderzoek in een breder perspectief getrokken gericht op consequenties voor de gehele wegenbouwsector. De verbetervoorstellen dienen volgens het model van Bate et al (1995), beschreven in hoofdstuk 1 (tabel 1.1), uitvoerbaar, herhaalbaar en robuust te zijn.

De verbetervoorstellen, naar aanleiding van dit onderzoek, zijn de volgende:

- Aanbevolen wordt om het verdichtingsvenster te laten afhangen van de temperatuur en de daarbij te behalen mechanische eigenschappen. De ontwikkelde procedure om temperatuur- en tijdsvensters te bepalen is daarbij goed bruikbaar;
- De kwaliteitscontrole van asfaltmengsels dient niet alleen achteraf op dichtheid plaats te vinden, maar ook op de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het proces en achteraf op de maatgevende mechanische eigenschappen;
- Het verdichtingsproces bij een STAB 0/16 mengsel (zonder PR) dient te beginnen bij 150-140 °C en tot 60 °C kan heeft het mengsel nog afgewalst worden. Op een relatief koude dag dient er dan begonnen te worden met verdichten 5-10 minuten na spreiden en te stoppen met verdichten anderhalf a twee uur na spreiden;
- Met de Freundl walssegmentverdichter wordt aanbevolen om krachtgestuurd te verdichten, zodat de werkelijkheid het best gesimuleerd wordt.

De uitvoerbaarheid van deze verbetervoorstellen is aangetoond voor een STAB 0/16 mengsel (zonder PR) en de herhaalbaarheid is voor meerdere STAB 0/16 asfaltplaten aangetoond. Bij kleine veranderingen in dichtheid en temperatuur blijven de verbetervoorstellen toepasbaar en zijn dus ook robuust.

6.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Aanbevelingen om verder onderzoek naar te doen zijn:

- Het effect van een koude oppervlaktetemperatuur en een warme midden en onderkant van de asfaltlaag op de mechanische eigenschappen voor verschillende asfaltlagen van de asfaltconstructie;
- De procedure om temperatuur- en tijdsvensters te bepalen toe te passen op meerdere mengsels om de procedure verder te verbeteren. Aanbevolen wordt om de procedure toe te passen op een deklaag, om te onderzoeken of de procedure ook werkt voor deklagen;
- Het zoeken naar mogelijkheden om bij te sturen tijdens het verdichtingsproces om de kwaliteitsvermindering bij een te lage verdichtingstemperatuur te voorkomen;
- Het nauwkeurig simuleren van walsregimes in het laboratorium met de Freundl walssegmentverdichter en het bepalen van de effecten van verschillende walsregimes;

- Het doen van meer praktijkmetingen; Volgende praktijkmetingen moeten plaatsvinden onder betere omstandigheden, in ieder geval zonder neerslag. Daarnaast is het van belang om een goed en homogeen klankbord te krijgen, hetgeen bereikt kan worden door een tussenlaag als te onderzoeken mengsel te kiezen. Verder wordt aangeraden om bij een volgende praktijkmeting te focussen op één of twee aspecten, zodat alle andere variabelen zo goed mogelijk gelijk gehouden kunnen worden.

7 Consequenties voor de wegensector

7.1 Huidige wegensector

Op dit moment zijn er een aantal belangrijke veranderingen gaande in de wegensector waardoor de werkvelden van opdrachtgevers en opdrachtnemers aan het veranderen zijn. De opdrachtgever blijkt zich te concentreren op haar kerntaken, bijvoorbeeld besturen of exploitatie van de gebouwde objecten en de opdrachtnemer bleek vaak aanzienlijk efficiënter of effectiever te kunnen produceren door het ontwerp aan te passen. Het nieuwe principe is daarom dat de opdrachtgever de gewenste functies specificiert en de opdrachtnemer het ontwerp maakt en uitvoert. Het is vervolgens aan de opdrachtnemer om, met gebruikmaking van zijn kennis, kunde en innovatief vermogen, deze functionele eisen uit te werken tot concrete werkzaamheden met de voor de opdrachtnemer meest gunstige prijs-kwaliteit verhouding. Deze veranderende werkvelden hebben als gevolg dat opdrachtgevers overgaan op langdurige onderhoudscontracten op prestatiebasis. Daarbij is het voor een opdrachtnemer van eigen en groter belang om de kwaliteit van het asfalt te kunnen beheersen en wordt een opdrachtnemer ook meer afgerekend op de kwaliteit die wordt geleverd.

Waar in de traditionele samenwerkingsvormen collectieve structuren (VBW-asfalt, CROW, opdrachtgevers) aanwezig waren als netwerk van vernieuwing, ontbreken deze structuren ten behoeve van vernieuwing in de huidige samenwerkingsvormen nog. Naar aanleiding van deze veranderingen heeft APSARi geconcludeerd dat een collectieve professionalisering van de asfaltwegensector nodig is om in te spelen op de veranderingen in de wegensector. Daarbij wordt geconcludeerd dat het meeste resultaat geboekt kan worden in het asfaltverwerkingsproces.

Er valt veel geld te winnen, maar ook te verliezen in het uitvoeringsproces. Een eerste stap die is gemaakt is het inzicht verkrijgen in de samenhang tussen de processen van aanvoer, verwerking en kwaliteit (promotieonderzoek Seirgei Miller). Hieruit is geconcludeerd dat de temperatuur van het asfaltmengsel en de verdichtingsprocedure belangrijk zijn voor de werkelijke eindkwaliteit die in het uitvoeringsproces behaald wordt. Dit onderzoek heeft zich gericht op het effect van de temperatuur waarop een asfaltmengsel verdicht wordt (een verwerkingsvariabele) op de kwaliteit in de vorm van mechanische eigenschappen.

7.2 Focus en conclusies van het onderzoek

De kwaliteit van een asfaltverharding is volgens asfalttechnologen in belangrijke mate afhankelijk van de verdichting van het asfaltmengsel. Hierbij is de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt, belangrijk voor eindkwaliteit van de asfaltverharding. Het idee bestaat dat er een venster van temperaturen is, en dus een tijdsvenster, waarop, met een hoge mate van waarschijnlijkheid, de beoogde mengseleigenschappen bereikt kunnen worden en het idee is dat verdichten buiten dit temperatuur- en tijdsvenster de mate van waarschijnlijkheid van het behalen van de beoogde mengseleigenschappen omlaag gaat.

Het doel van dit onderzoek is dan ook geweest 'het ontwikkelen van een procedure om de temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels te kunnen bepalen' op basis van de behaalde mechanische eigenschappen. Uit het empirisch onderzoek is gebleken dat de temperatuur tijdens verdichting sterk van belang is voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding, ongeacht of de streefdichtheid behaald kan worden. Verdichting buiten het temperatuurvenster kan daarbij tot 40% vermindering van de eindkwaliteit leiden en dus afhankelijk van het potentiële maatgevende schadebeeld levensduurvermindering als gevolg hebben.

In een kwaliteitscontrole waarbij alleen de dichtheid achteraf wordt gecontroleerd wordt de genoemde kwaliteitsvermindering niet gedetecteerd. Het is daarom niet voldoende om alleen de dichtheid te controleren, maar ook de verdichtingstemperatuur tijdens het verwerkingsproces, zodat er ook nog bijgestuurd kan worden tijdens het proces. De dichtheid kan immers ook gehaald worden door er

meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten. Bij traditionele samenwerkingsvormen was er toezicht bij de uitvoering om dit probleem in de hand te houden, maar bij de nieuwe samenwerkingsvormen past het, dat de opdrachtnemer zelf de kwaliteit van zijn werk door keuringen en zonodig verbeteringen op het gewenste niveau brengt en houdt. Het monitoren en het expliciet vastleggen van de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt tijdens het proces met als doel om bij te kunnen sturen in het verwerkingsproces draagt bij aan het behalen van een bepaald kwaliteitsniveau. De meest voor de hand liggende actie om bij te sturen in dit verwerkingsproces bij een te lage temperatuur is het lokaal verstevigen van de asfaltconstructie (dikkere asfaltlaag, aanbrengen van asfaltwapening, etc.). Afhankelijk van het werk kunnen verdergaande maatregelen ook mogelijk zijn, zoals het uitvoeren van reparaties of zelfs eventueel het stilleggen van het werk.

7.3 Consequenties voor de wegebouwsector

De conclusies uit dit onderzoek zullen een aantal consequenties voor de huidige manier van werken in de wegebouw moeten hebben. De belangrijkste consequentie is dat de gehele wegebouwsector zich dient te realiseren dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt de eindkwaliteit van de asfaltverharding sterk kan bepalen, en dus levensduurverkorting tot gevolg kan hebben. Daarom is het van belang om deze temperatuur tijdens het proces te monitoren en expliciet vast te leggen met als doel om bij te kunnen sturen tijdens dit proces. Bij het expliciet vastleggen van de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens het verwerkingsproces zijn nieuwe meettechnologieën van belang. Een Linescanner, infraroodcamera's en thermokoppels zijn hiervoor bruikbare instrumenten.

Door het inzicht dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt van belang is, zijn ook een aantal risico's expliciet gemaakt wanneer buiten het temperatuurvenster verdicht wordt. Verdichten buiten het temperatuurvenster heeft een vermindering van de eindkwaliteit tot gevolg, en dus levensduurverkorting van de asfaltverharding. Deze levensduurverkorting van de asfaltverharding kan grote gevolgen hebben; ten eerste betreffende de beschikbaarheid van de weg, omdat er eerder dan gepland, dus onverwachts, wegwerkzaamheden uitgevoerd moeten worden en ten tweede betreffende de garantie van het werk, omdat een mindere kwaliteit is geleverd dan beloofd in het ontwerp met als mogelijk gevolg discussie over de garantie van het werk en dus financiële afrekening van het werk.

Het besef dat de temperatuur van het asfaltmengsel van belang is en wetende wat de risico's zijn bij onwetendheid over deze parameter, dienen er gevolgen te zijn in verschillende processen van de wegebouw, beginnende bij het ontwerp, ook tijdens het uitvoeringsproces en zelfs voor de acceptatie van een werk, hetgeen dus van belang is voor opdrachtgevers en opdrachtnemers.

Een (technisch) ontwerper dient rekening te houden met de variabiliteit in de temperatuur van het asfaltmengsel en welke gevolgen dit kan hebben in de variabiliteit van de kwaliteit van het asfalt. De variabiliteit in temperatuur, en dus in kwaliteit, zou kunnen leiden tot een andere laagdikte of een iets andere mengselsamenstelling. Verder dient een (logistiek) ontwerper rekening te houden dat een slechte logistiek, een daling in temperatuur als gevolg kan hebben en dus ook een daling van de eindkwaliteit van het asfalt.

Ook bij het uitvoerende personeel dient een realiteitsbesef door te dringen dat de temperatuur waarop een asfaltmengsel verdicht wordt wel degelijk van belang is voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding en dus het financiële resultaat van een project. Een belangrijke vervolgstap om verder onderzoek naar te doen is het zoeken naar mogelijkheden in het asfaltverwerkingsproces om deze kwaliteitsvermindering te verminderen of te voorkomen en de variabiliteit in kwaliteit te verminderen. Een besef alleen dat de temperatuur van het asfaltmengsel van belang is, niet wetende wat de mogelijke bijsturingmogelijkheden zijn, is namelijk niet voldoende om het doel (bijsturing tijdens het proces) te behalen. Een eerste stap is weliswaar gemaakt, maar bij het ontbreken van vervolgstappen zal het onderzoek tot nu toe weinig effectief blijken.

Juist voor de acceptatie (UAVgc) of oplevering (UAV) van het werk is het besef dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt van belang is, erg belangrijk. Het doel van accepteren is het

in ontvangst nemen van de producten van de opdrachtnemer en het beëindigen van de contractverplichtingen tot op dat moment met als gevolg het uitvoeren van de tegenprestatie (betaling). Wanneer er geen besef is dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt van belang is kan een product worden geaccepteerd (onwetendheid) of moet een product geaccepteerd worden (onkunde) dat niet voldoet aan de beoogde (kwaliteits)doelen. Een opdrachtgever dient zich dus te realiseren dat de temperatuur waarop een asfaltmengsel verdicht wordt van belang is om van de onwetendheid af te komen dat een onvolkomen product geaccepteerd wordt. Daarnaast zal een opdrachtgever in de vraagspecificatie (of het document voortkomende uit de initiatieffase van een project), functionele, eisen moeten stellen aan het eindproduct om verborgen gebreken bij acceptatie of oplevering op te kunnen merken (en dus van zijn onkunde af te komen). Ook dient een opdrachtgever zich te realiseren welke risico's gelopen worden wanneer gebreken voortkomende uit de verdichtingstemperatuur van het asfaltmengsel niet functioneel gespecificeerd zijn in de vraagspecificatie. Met name bij verborgen gebreken in de onderkant van de asfaltconstructie, oftewel de structurele levensduur van de asfaltverharding, is dit van belang, omdat dit grote gevolgen kan hebben voor de beschikbaarheid van de weg, omdat groot onderhoud gepleegd moet worden. Dit maakt het dus ook van groot belang voor opdrachtgevers om inzicht te krijgen in de asfaltverwerkingsprocessen, zodat volledig gespecificeerde functionele eisen gesteld kunnen worden aan het eindproduct.

Resumé; Het inzicht dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt van belang is voor de eindkwaliteit van de asfaltverharding dient proactief handelen als gevolg te hebben. Vooraf kunnen inschattingen gemaakt worden van het weer, logistiek, etc. die invloed zullen hebben op de temperatuur van het asfaltmengsel en daarmee op de eindkwaliteit van het asfalt. De variabiliteit in temperatuur moet dus invloed hebben op het ontwerpen en de manier van uitvoeren.

7.4 Tot slot

De ontwikkelde procedure om temperatuur- en tijdsvensters voor het verdichten van Nederlandse asfaltmengsels te bepalen helpt in een aanpak naar methode gebaseerde werkwijzen, zodat ook onder minder gunstige omstandigheden volgens methoden en procedures gewerkt kan worden. Het inzicht dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt van belang is en welke gevolgen en risico's dit mee brengt is een eerste stap in de procesanalyse van het asfaltverwerkingsproces en is van belang voor opdrachtgevers en opdrachtnemers. Een logische vervolgstap voor ASPARi lijkt, nu er inzicht is verkregen in de primaire processen van aanvoer, verwerking en kwaliteit (promotieonderzoek Seirgei Miller), verder onderzoek te doen, in het kader van risicobeheersing, naar de relatie tussen verwerkingsprocessen en de eindkwaliteit van de asfaltverharding. Het belang van opdrachtnemers ligt in dit vervolgonderzoek met name in het verbeteren van de eindkwaliteit en in het zoeken naar mogelijkheden in het verwerkingsproces en zonodig op tijd bij te kunnen sturen in het proces. Het belang van opdrachtgevers in dit vervolgonderzoek ligt in het verkrijgen van inzicht in asfaltverwerkingsprocessen en daaruit voortvloeiende (functionele) eisen die aan het eindproduct (asfaltverharding) gesteld kunnen worden om, eventuele, verborgen gebreken in een vroeg stadium vast te kunnen stellen.

Het belang van opdrachtgevers kan worden geïllustreerd met een probleem waar Rijkswaterstaat tegenaan is gelopen. Rijkswaterstaat is voor bepaalde asfaltmengsels (bijvoorbeeld tweelaags ZOAB) op zoek geweest naar verbeteringen van de homogeniteit in kwaliteit van asfaltmengsels (en dus een kleinere spreiding in de levensduur en het verhogen van de levensduur van de asfaltverharding), waarbij als mogelijke oorzaak lokale afkoelingen van het asfaltmengsel werden aangegeven. In het onderzoek tot nu toe is empirisch aangetoond dat de temperatuur waarop het asfaltmengsel verdicht wordt een belangrijke parameter voor deze variabiliteit in kwaliteit kan zijn. Dus ook in dit onderzoekskader van Rijkswaterstaat kan het vervolgonderzoek van belang zijn, zodat de spreiding in levensduur van de asfaltverharding kan worden verkleind door het vergroten van de temperatuurhomogeniteit, zodat een hogere levensduur behaald kan worden.

Literatuurlijst

- Bate, R., Kuhn, D., en Wells, C. (1995). *A Systems Engineering Capability Maturity Model*.
- Chadbourn, B. A., Newcomb, D. E., Voller, V. R., Desombre, R. A., Luoma, J. A., en Timm, D. H. (1998). "An asphalt paving tool for adverse conditions." *Minnesota Dept. of Transportation Final Report MN/RC-1998*, 18.
- Bossemeyer, H. R. (1986). *Temperaturverlauf beim Einbau von bituminösen Mischgüt*, Technischen Hochschule Darmstadt.
- Daines, M. E. (1985). "Cooling time of bituminous layers and time available for their compaction." *Transport and road research laboratory report*, 4.
- De Bondt, A. H. (1999). Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays.
- De Man, M. (2008). "Leren door reflecteren; Een methode om asfaltverwerkingsploegen tot meer lerende en reflecterende teams te vormen." *Afstudeerrapport universiteit Twente*.
- Decker, D. S. (2006). "State-of-the-Practice for Cold-Weather Compaction of Hot-Mix Asphalt Pavements." *Factors Affecting Compaction of Asphalt Pavements*, 27.
- Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L., Reubush, S. D., en Freeman, T. E. "Development and Validation of a Model to Predict Pavement Temperature Profile."
- Dorée, A. G., Miller, S. R., en Ter Huerne, H. L. (2008). "Asfalt, wat bakken we ervan?" *Combinatie van artikel en presentatie van de CROW infradagen*
- Dorée, A. G., en ter Huerne, H. L. (2005). "Professionalisering asfalt wegenbouw sector; Van ambacht naar industrie."
- Erkens, S. M. J. G. (2002). Asphalt concrete response; Determination, modelling and prediction.
- Figge, H. (1987). Verdichtungs- und belastungsverhalten bituminöser gemische (Dissertation).
- Head, K. H. (1980). Manual of soil laboratory testing.
- Jordan, P. G., Thomas, M. E. (1976). "Prediction of cooling curves for hot-mix paving materials by a computer program." *Transport and road research laboratory report*.
- Khan, Z. A., Al-Abdul Wahab, H. I., Asi, I., en Ramadhan, R. (1998). "Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction." *Construction and Building Materials*, 12, 373-384.
- Krass, K. (1971). Kriechuntersuchungen an Zylindrischen Asphaltprobekörpern.
- Luoma, J. A., Allen, B., Voller, V. R., Newcomb, D. E. (1995). "Modeling of heat transfer during asphalt paving." *Numerical methods in thermal problems*, 6 (2), 1125-1135.
- McClave, J. T., Benson, P. G., en Sincich, T. (2007). *Statistiek; Een inleiding voor het hoger onderwijs*.
- Miller, S. R., en Dorée, A. G. (2008). "Temperature profiling and the monitoring of equipment movements during construction".
- Miller, S. R., en Dorée, A. G. (2009). "Proefproject Aziëhavenweg." *Asfalt nr. 2, juni 2009*.
- Molenaar, A. A. A. (1983). Structural performance and design of flexible road constructions and asphalt concrete overlays.
- Molenaar, A. A. A., en Houben, L. J. M. (2003). Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen.
- Mollenhauer, K. "Comparative test project + standard compaction procedure." *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Rhodos.
- Mollenhauer, K., en Wistuba, M. P. "Experiences from comparative laboratory testing." *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Rhodos.
- NEVUL. (2006). Nevul; Activiteiten 2005, certificatie 2006, lijst erkende vulstofmerken.
- Nijboer, L. W. (1948). "Plasticity as a factor in the design of dense bituminous road carpets." Elsevier, New York.

- Recasens, M., Rodrigo, P., Jiménez, F., en Martínez, A. (2000). "Quality specifications for bituminous mixtures using the indirect tensile strength." 2nd Europhalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- Rijkswaterstaat. (2005). Bitumineuze overgangsconstructie; Besteksomschrijving aansluiting wegdek brugdek A73-Zuid
- Simons, B., en ter Huerne, H. L. (2008). "Op weg naar een beter beheerst asfaltverwerkingsproces." *VBW-Asfalt*, Nr. 2, p. 16-20.
- Sluer, B. (2007). "Zoab in process; Zo naar verbetering van levensduur."
- Ter Huerne, H. L. (2004). *Compaction of Asphalt Road Pavements Using Finite Elements and Critical State Theory*, University of Twente.
- Ter Huerne, H. L., Van Maarseveen, M. F. A. M., Molenaar, A. A. A., en Van De Ven, M. F. C. (2008) 'Simulation of HMA compaction by using FEM', *International Journal of Pavement Engineering*, 9:3, 153 – 163
- Ter Huerne, H. L., en Dorée, A. G. (2005). Professionalisering asfalt wegenbouw sector, van ambacht naar industrie.
- Timm, D. H., Voller, V. R., Lee, E., en Harvey, J. (2001). "Calcool: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction." *International Journal of Pavement Engineering*, 2(3), 169-185.
- Van Dee, R. (1999). Modelling of the compaction of asphalt layers: A survey into the influence of various factors on the compaction of asphalt layers in practice, Technische universiteit Delft.
- Van der Velden, J. W. (2003). *Wegenbouwkunde*, Wolters-Noordhoff b.v.
- Van Stek, P. J., en Linden, A. H. G. (1992). *Het verdichten van asfalt in de praktijk*, VBW-asfalt.
- VBW-asfalt. (2000). Asfalt in wegen- en waterbouw.
- VBW-asfalt. (2001). "Functionele proeven voor asfalt." *Asfalt nr. 3*, 2001.
- VBW-asfalt. (2003). "Waarom walsen?"
- Verbaan, W. (2008). *Mega Trends Bouw*, Stichting PSIBouw.
- Verschuren, P., en Doorewaard, H. (2007). "Het ontwerpen van onderzoek." Den Haag: LEMMA.
- Wennigsen, B.-P. (2008). Handleiding walssectorcompressor WSV-2008.
- Wistuba, M. P. "Status quo in the european union." Advanced testing and characterization of bituminous materials, Rhodos.

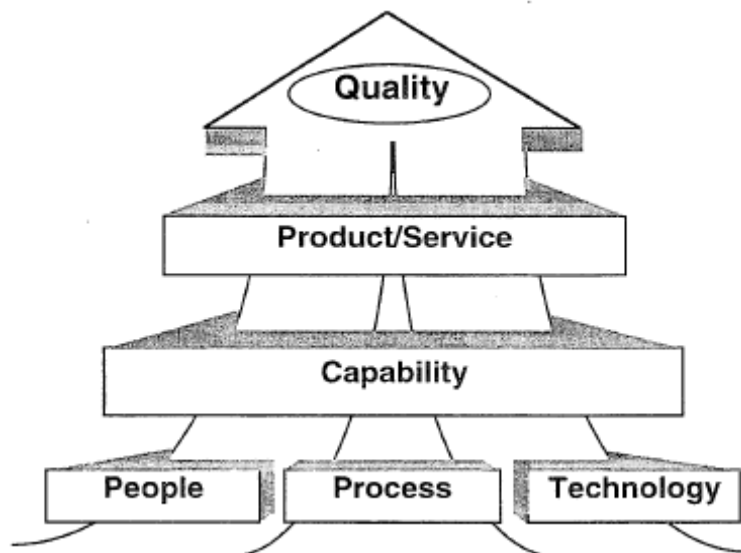
Bijlagen

Bijlage 1.1: Vergelijkingsgrondslag procesverbeteringen (Bate et al, 1995)

Bate et al (1995) hebben een Systems Engineering Capability Maturity Model (SE-CMM) ontwikkeld. Het model beschrijft de essentiële elementen van het SE-proces. Het biedt een manier om het SE-proces te vergelijken met de essentiële elementen van procesbeheersing. Bate et al (1995) gebruiken de volgende definitie voor SE: Een selectieve toepassing met wetenschappelijke en technische inspanningen om (1) wensen om te zetten in gedefinieerde eisen, (2) het integreren van technische parameters en (3) het integreren van alle disciplines en specialiteiten (Bate et al., 1995).

Belangrijk in het SE-proces is het expliciet definiëren van het systeem, en dus ook de omgeving en welke effecten deze omgeving op het systeem heeft. De scope van het model betreft alle fasen van de levenscyclus van het systeem gefocust op de proceskarakteristieken.

Dit model stelt dat de kwaliteit van een product een functie is van mensen, processen en technologieën (zie figuur 1.1). Bate et al (1995) focussen op de processen en stellen dat de processen de belangrijkste van de drie is, omdat processen, mensen en technologieën integreren, processen de voorspelbaarheid van de prestaties verbeteren, evenals de prestaties zelf (Bate et al., 1995).



Figuur 1.1: Kwaliteit als functie van mensen, processen en technologieën

De proceskwaliteit is gedefinieerd als 'een kwantificeerbare hoeveelheid (verwachte) resultaten die bereikt kunnen worden door een proces'. Voor elk proces kan de proceskwaliteit worden bepaald. Het belang van het bepalen van de proceskwaliteit ligt in het evalueren of de doelen zijn/worden gehaald. Projecten met een lage proceskwaliteit ervaren veelal grote variaties in kosten, planning, functionele en kwaliteitsdoelen (Bate et al., 1995).

SE-CMM beschrijft expliciet de fasen waarin een proces wordt gedefinieerd, gecontroleerd, geïmplementeerd en verbeterd. Het model biedt een handleiding voor strategieën om procesverbeteringen door te voeren. Bate et al (1995) hebben een schaal ontwikkeld om procesverbeteringen te beoordelen en evalueren. Deze schaal van het vermogen om procesverbeteringen door te voeren is weergegeven in tabel 1.1.

Onder level 1 (level 0) zitten processen die voltooid worden, maar onduidelijk is hoe dit gedaan wordt. Prestaties zijn totaal niet consistent en processen zijn met name afhankelijk van bepaalde mensen. Level 1 kenmerkt zich doordat alle basisprocessen worden gedaan, alleen worden deze niet gepland en gecontroleerd. Producten worden wel adequaat gemaakt, alleen hangen de kwaliteit en efficiëntie in belangrijke mate af van individuen binnen de organisatie. Op basis van ervaring weet men

dat een bepaalde actie tot een bepaald prestatie leidt, maar herhaalbaarheid is uiterst onzeker. Op level 2 worden processen ook gepland en gecontroleerd. Correcties worden genomen als producten beginnen te variëren, en dit is dus met name een reactief proces. Omdat de processen zijn gepland en gecontroleerd kunnen processen herhaalbaar worden, maar niet per definitie altijd toepasbaar in de gehele breedte van de organisatie. Bij level 3 worden processen ook gedocumenteerd en gestandaardiseerd. Data wordt verzameld om het proces eventueel aan te passen en te verbeteren, hetgeen weer gebruikt kan worden in de plannings. Op dit level worden processen organisatiebreed gestandaardiseerd en toegepast. Deze standaard procedures en methoden kunnen ook bij nieuwe projecten worden gebruikt. Level 4 wordt gekenmerkt door de kwantitatief gestelde doelen en gedetailleerde metingen van prestaties. De data geeft inzicht in de kwantitatieve prestaties en zorgen ervoor dat de prestaties beter voorspeld kunnen worden. De prestaties worden goed gemanaged en defecten worden geïdentificeerd en zo nodig gecorrigeerd. Het hoogste level kenmerkt zich door kwalitatieve en kwantitatieve effectiviteit en efficiëntie gebaseerd op lange-termijn doelen en strategieën. Een continu verbeterend proces dat gekenmerkt wordt door feedback en automatisch corrigeren van defecten en het implementeren van innovatieve ideeën en technologieën (Bate et al., 1995).

Tabel 1.1: Vergelijkingsgrondslag procesverbeteringen (Bate et al., 1995)

Level	Vermogen om verbeteringen door te voeren	Beschrijving
1	Ad hoc (chaotisch)	Processen zijn ongedocumenteerd, in staat van dynamische veranderingen, ongecontroleerd en reactief
2	Herhaalbaar	Processen zijn herhaalbaar met consistente resultaten en kunnen gepland en geverifieerd worden
3	Gedefinieerd	Processen zijn gedefinieerd, gedocumenteerd en gestandaardiseerd. Deze processen zorgen voor consistentie van procesprestaties binnen het bedrijf
4	Gemanaged	Processen worden gedetailleerd gemeten op prestaties worden verzameld en geanalyseerd
5	Optimaliserend	Voortdurende verbetering van processen door innovatieve verbeteringen

Bijlage 1.2: Onderzoeksvragen samengevat

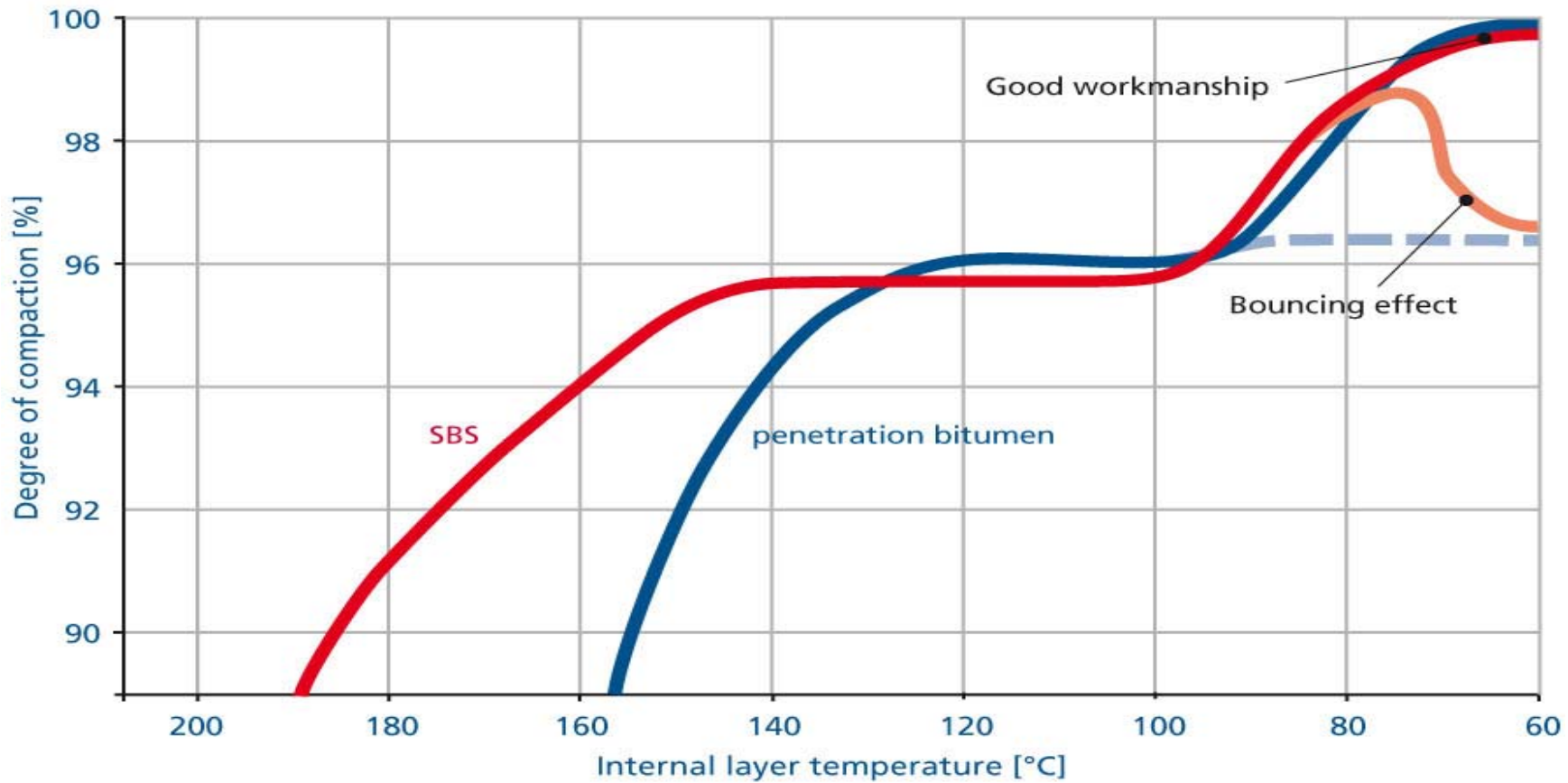
In tabel 1.2 zijn de onderzoeksvragen, het beoogde resultaat en de aanpak weergegeven.

Tabel 1.2: Onderzoeksvragen, aanpak en beoogde resultaten

Nr.	Onderzoeksvraag	Aanpak	Beoogde resultaat
Theorie			
1	Welke parameters zijn van invloed op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces?	Combineren antwoorden deelvragen	Beschrijving asfaltmengsel, verdichtingsproces en afkoelingsproces
1.1	Wat is asfalt en welke materiaaleigenschappen heeft een asfaltmengsel betreffende de verdichting?	Literatuuronderzoek	Beschrijving asfaltmengsel en materiaaleigenschappen asfaltmengsel
1.2	Hoe vindt het verdichtingsproces in de huidige bouwpraktijk plaats?	Literatuuronderzoek	Beschrijving verdichtingsproces
1.3	Hoe kan de afkoeling van een asfaltmengsel worden voorspeld en welke parameters zijn hierop van invloed?	Literatuuronderzoek	Keuze afkoelingsmodel en belangrijke parameters van afkoeling
1.4	Hoe is de temperatuurverdeling binnen het asfaltmengsel tijdens het afkoelingsproces?	Literatuuronderzoek	Temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling volgens theorie
Empirie			
2	Welke effecten hebben verschillende verdichtings-temperaturen op de verdichtingskracht, verdichtingsenergie en de dichtheid?	Combineren antwoorden deelvragen	Effect verdichtingstemperatuur op verdichtingskracht, verdichtingsenergie en dichtheid en de homogeniteit van de verdichtingstemperatuur
2.1	Welke effecten hebben verschillende verdichtings-temperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie onder laboratoriumomstandigheden?	Laboratoriumexperimenten	Effect verdichtingstemperatuur op verdichtingskracht en verdichtingsenergie in laboratorium
2.2	Welke effecten hebben verschillende verdichtings-temperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie in de praktijk?	Praktijkmetingen	Effect verdichtingstemperatuur op verdichtingskracht en verdichtingsenergie in de praktijk
2.3	Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtings-temperaturen te behalen onder laboratoriumomstandigheden?	Laboratoriumexperimenten	Effect verdichtingstemperatuur op dichtheid in laboratorium
2.4	Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtings-temperaturen te behalen in de praktijk?	Praktijkmetingen	Effect verdichtingstemperatuur op dichtheid in de praktijk
2.5	Hoe is de temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de praktijk?	Praktijkmetingen	Temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling praktijk
3	Wat zijn de mechanische consequenties van het verdichten bij verschillende verdichtingstemperaturen?	Combineren antwoorden deelvragen	Mechanische consequenties bij verschillende verdichtingstemperaturen
3.1	Welke effecten hebben verschillende verdichtings-temperaturen op de mechanische eigenschappen onder laboratoriumomstandigheden?	Laboratoriumexperimenten	Effect verdichtingstemperatuur op mechanische eigenschappen in laboratorium
3.2	Welke effecten hebben verschillende verdichtings-temperaturen op de mechanische eigenschappen in de praktijk?	Praktijkmetingen	Effect verdichtingstemperatuur op mechanische eigenschappen in de praktijk
Analyse			
4	Wat zijn het temperatuur- en tijdsvenster voor het onderzochte mengsel?	Combineren antwoorden deelvragen	Temperatuur- en tijdsvenster onderzochte mengsel
4.1	Wat is het temperatuurvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?	Analyseren data	Temperatuurvenster onderzochte mengsel
4.2	Wat is het tijdsvenster voor het onderzochte mengsel onder de onderzochte omstandigheden?	Analyseren data	Tijdsvenster onderzochte mengsel
Doel			
5	Volgens welke procedure kunnen temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels worden bepaald?	Conclusies trekken uit geanalyseerde data	Procedure bepalen temperatuur- en tijdsvensters voor de verdichting van Nederlandse mengsels

Bijlage 2.1: Fasen verdichtingsproces volgens Ooms

Sketch of compaction mechanism of high-quality SBS modified asphalt

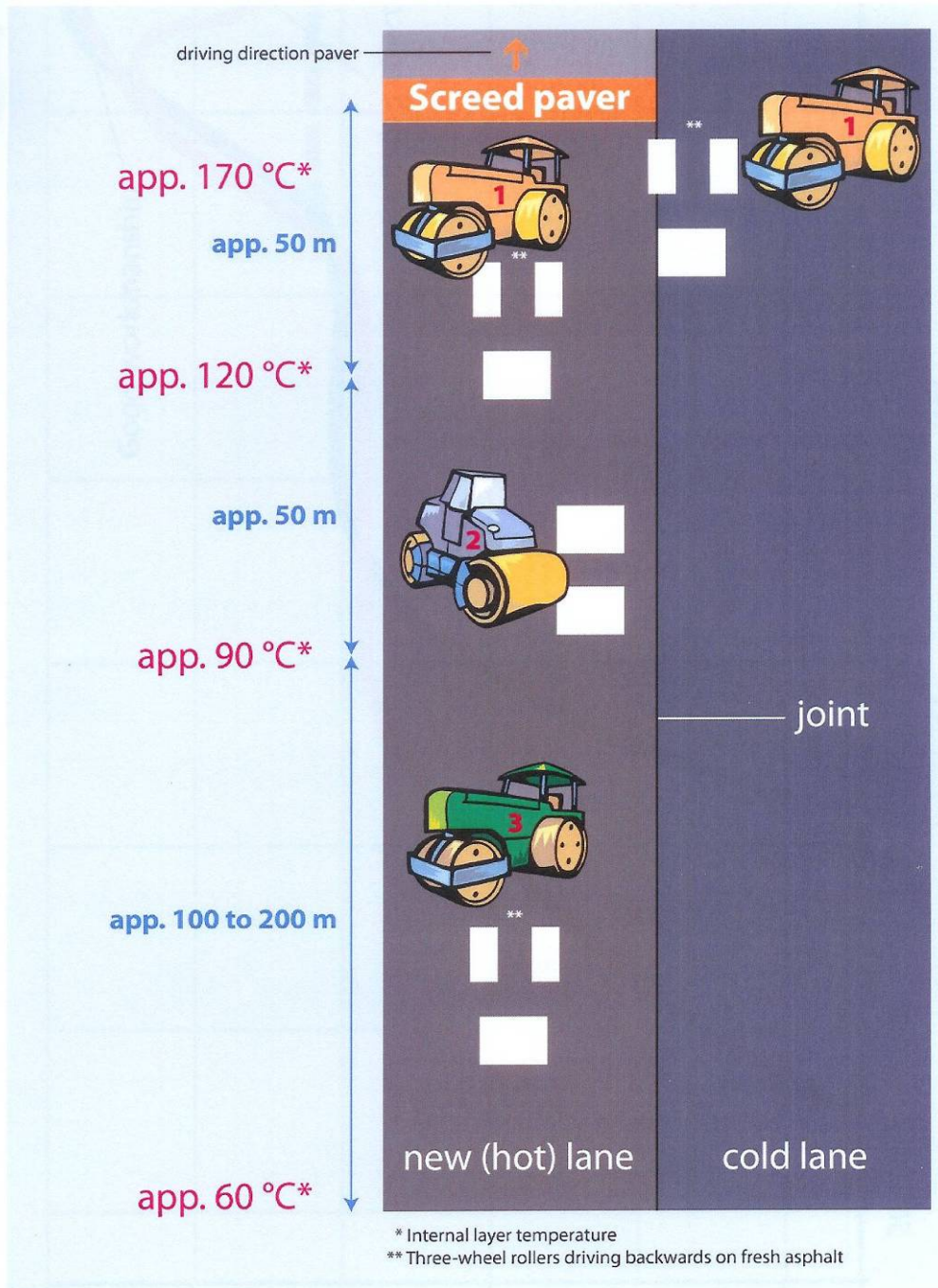


Good workmanship: When continuing compaction till 60 °C (internal layer temperature)

Bouncing effect: When ending compaction at 80-90 °C (internal layer temperature)

Illustration of Sealoflex® rolling process

project A45 Billing - May/June 2008



Ooms

International Holding bv

Bijlage 3.1: Fotoreportage proces laboratoriumonderzoek

In deze appendix wordt het proces van verdichten tot aan beproeven in chronologische volgorde in beeld met behulp van foto's weergegeven.

Vorbereidingen



Figuur 3.1: Aankomst materiaal



Figuur 3.2: Materialen drogen



Figuur 3.3: Materialen zeven



Figuur 3.4: Materialen invegen

Verdichten met de Freundl plaatverdichter



Figuur 3.5: Materialen in de stoof verwarmen



Figuur 3.6: Bitumen invegen



Figuur 3.7: Materiaal in de menger



Figuur 3.8: Temperatuur meten na het mengen



Figuur 3.9: Materiaal wegen



Figuur 3.10: Materiaal en thermodraden aanbrengen



Figuur 3.11: Afolakken



Figuur 3.12: Temperatuur meten voor verdichten



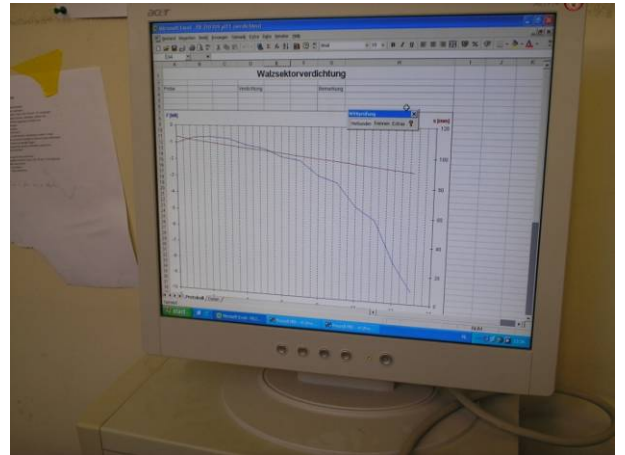
Figuur 3.13: Papier aanbrengen



Figuur 3.14: Freundl plaatverdichter instellen



Figuur 3.15: Verdichten met de Freundl plaatverdichter



Figuur 3.16: Verdichting volgen op de pc



Figuur 3.17: Steunbak plaats



Figuur 3.18: Steunbak met plaat loshalen



Figuur 3.19: Asfaltplaat met steunbak



Figuur 3.20: Asfaltplaat zonder steunbak

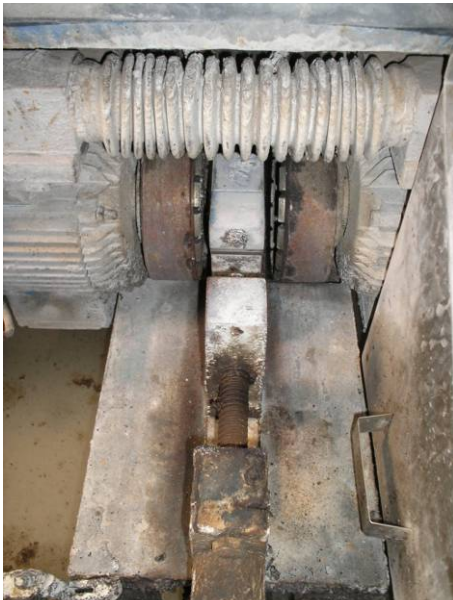
Boren, slijpen, wegen en in de koeling



Figuur 3.21: Boren van kernen



Figuur 3.22: Geboorde kernen



Figuur 3.23: Slijpen van kernen



Figuur 3.24: Geslepen kernen

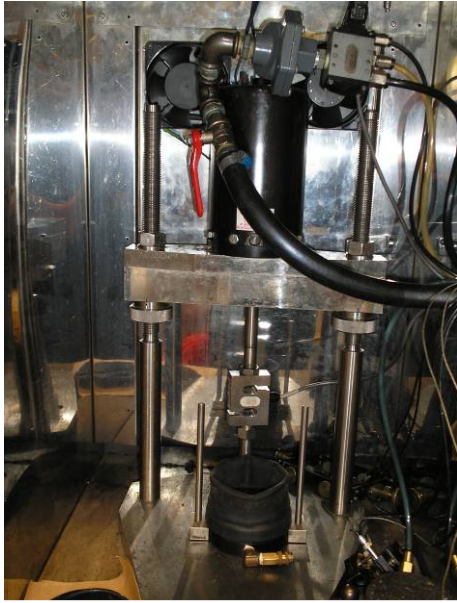


Figuur 3.25: Onder en boven water wegen



Figuur 3.26: Kernen in de koeling

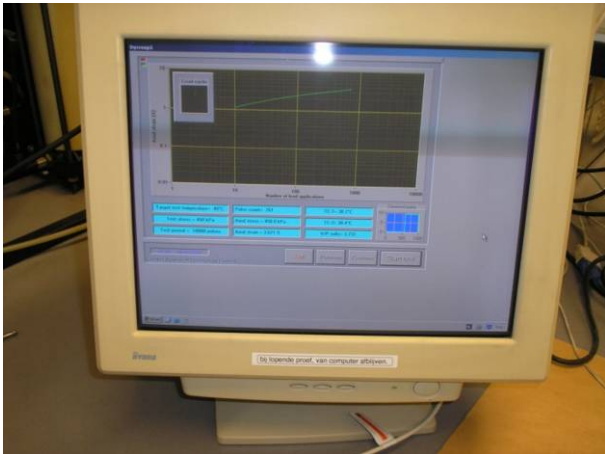
Beproeven



Figuur 3.27: Proefopstelling triaxiaalproef



Figuur 3.28: Wrijfingreductie aanbrengen



Figuur 3.29: Resultaten op de pc volgen



Figuur 3.30: Proefopstelling (detail)



Figuur 3.31: Proefopstelling slijtproef



Figuur 3.32: Gespleten kernen

Asfaltwegenbouw



op weg naar professionalisering

Achtergrondmateriaal literatuur en empirisch onderzoek

-
appendix afstudeerrapport

In het kader van ASPARi:

Uitgevoerd bij:

UNIVERSITEIT TWENTE.



Ooms

Nederland Holding bv

F.R. Bijleveld
Appendix afstudeerrapport
Universiteit Twente
Februari 2010

Product: Appendix afstudeerrapport

Opleiding: Universiteit Twente
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Civiele techniek

Titel: Asfaltwegenbouw, op weg naar professionalisering - Achtergrondmateriaal literatuuronderzoek en empirisch onderzoek – appendix afstudeerrapport

Auteur: F.R. Bijleveld
Studentnummer: 0160911

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir. A.G. Dorée	Universiteit Twente	Voorzitter
dr. ir. A.H. de Bondt	Ooms Nederland Holding bv	Extern begeleider
dr. ir. H.L. ter Huerne	Universiteit Twente	Begeleider
ir. S.R. Miller	Universiteit Twente	Begeleider

Status: Definitief

Aantal pagina's rapport: 145
Aantal pagina's hoofdtekst: 110

Datum uitgave: 10 februari 2010

Voorwoord

Dit is een aparte appendix behorende bij het afstudeerverslag. In deze appendix is het achtergrondmateriaal van het literatuuronderzoek en het empirisch onderzoek, bestaande uit het laboratoriumonderzoek en de praktijkmetingen, opgenomen. Op deze manier zijn alle details en keuzes die gemaakt zijn na te lezen, zodat geen informatie verloren gaat.

Veel leesplezier!

Frank Bijleveld
Scharwoude, januari 2010

Inhoud

1	Appendix: Theorie over de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting.....	1
1.1	<i>Het asfaltmengsel.....</i>	1
1.1.1	Bouwstoffen van het asfaltmengsel	1
1.1.1.1	Bitumen.....	2
1.1.1.2	Vulstof.....	3
1.1.2	Soorten asfaltmengsels	4
1.1.3	Gedrag van asfaltmengsels	5
1.1.4	Mechanische eigenschappen.....	7
1.1.4.1	Vervorming	7
1.1.4.2	Scheurvorming / vermoeiing	8
1.1.4.3	Proeven	8
1.1.5	Conclusies.....	10
1.2	<i>Het verwerkingsproces.....</i>	11
1.2.1	Dichtheid van het asfaltmengsel	12
1.2.2	Asfaltverwerking.....	13
1.2.3	Asfaltverdichting.....	14
1.2.4	Fasen asfaltmengsel verdichtingsproces.....	17
1.2.5	Verdichtingsmethoden	18
1.2.6	Conclusies.....	21
1.3	<i>De temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting</i>	23
1.3.1	Afkoeling van asfalt	23
1.3.1.1	An asphalt paving tool for adverse conditions (Chadbourn et al., 1998)	24
1.3.1.2	Modelling of the compaction of asphalt layers (Van Dee, 1999).....	25
1.3.1.3	Compaction of asphalt road pavement (Ter Huerne, 2004).....	25
1.3.1.4	Modeling of the compaction of asphalt layers (Miller en Dorée, 2008)	26
1.3.2	Homogeniteit temperatuur asfaltlaag	27
1.3.2.1	Compaction of asphalt road pavements (Ter Huerne, 2004).....	27
1.3.2.2	Modelling of the compaction of asphalt layers (Van Dee, 1999).....	29
1.3.2.3	Calcool: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction (Timm et al, 2001)	29
1.3.3	Proefproject	30
1.3.4	Meten van de temperatuur	30
1.3.5	Conclusies.....	31
1.4	<i>Conclusie theorie.....</i>	32
2	Appendix: Empirische onderzoeken	34
2.1	<i>Proeven en meetinstrumenten</i>	34
2.1.1	Temperatuur	35
2.1.2	Verdichting.....	37
2.1.3	Proefstukken en dichtheid	40
2.1.4	Mechanische eigenschappen.....	42
2.1.5	Conclusies proeven en meetinstrumenten empirisch onderzoek.....	46
2.2	<i>Laboratoriumonderzoek.....</i>	48
2.2.1	Positie gestuurde verdichting.....	48
2.2.1.1	Temperatuur	48
2.2.1.2	Verdichting.....	50
2.2.1.3	Dichtheid	52
2.2.1.4	Mechanische eigenschappen.....	55

2.2.1.5	Conclusies positie gestuurde verdichting.....	63
2.2.2	Kracht gestuurde verdichting.....	65
2.2.2.1	Temperatuur	65
2.2.2.2	Verdichting.....	66
2.2.2.3	Dichtheid	68
2.2.2.4	Mechanische eigenschappen.....	70
2.2.2.5	Conclusies kracht gestuurde verdichting.....	75
2.2.3	Positie gestuurde verdichting versus kracht gestuurde krachtverdichting.....	77
2.2.3.1	Dichtheid	77
2.2.3.2	Mechanische eigenschappen.....	77
2.2.3.3	Conclusies positieverdichting versus krachtverdichting.....	80
2.2.4	Elastische terugvering	81
2.2.5	Textuur.....	83
2.2.6	Conclusies laboratoriumonderzoek.....	85
2.3	<i>Praktijkmeting</i>	87
2.3.1	Doel en concept praktijkmeting	87
2.3.2	Beschrijving en aanpak praktijkmeting.....	89
2.3.3	Resultaten praktijkmeting.....	90
2.3.3.1	Temperatuur	90
2.3.3.2	Verdichting.....	95
2.3.3.3	Dichtheid	98
2.3.3.4	Mechanische eigenschappen.....	100
2.3.3.5	Textuur.....	104
2.3.4	Conclusies praktijkmeting	104
2.4	<i>Laboratorium versus praktijk</i>	107
2.4.1.1	Dichtheid	107
2.4.1.2	Mechanische eigenschappen.....	107
2.4.1.3	Conclusies positieverdichting versus krachtverdichting.....	109
2.5	<i>Conclusies empirisch onderzoek</i>	109
Literatuurlijst.....		111
Bijlagen appendix.....		113
<i>Bijlage 1.1: Fasen verdichtingsproces volgens Ooms.....</i>		<i>114</i>
<i>Bijlage 2.1: Fotoreportage proces laboratoriumonderzoek.....</i>		<i>116</i>
<i>Bijlage 2.2: Testen positie- en kracht-gestuurde verdichting.....</i>		<i>122</i>
<i>Bijlage 2.3: Kalibratie thermokoppels.....</i>		<i>129</i>
<i>Bijlage 2.4: Toetsing betrouwbaarheid proeven</i>		<i>132</i>
<i>Bijlage 2.5: Resultaten penetratieproeven en Ring&kogelproeven</i>		<i>138</i>

1 Appendix: Theorie over de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting

Het doel van het afstudeeronderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvenster voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Zoals in het onderzoeksmodel beschreven wordt deze procedure ontwikkeld door empirisch onderzoek te doen op één Nederlands asfaltmengsel naar de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Op basis van het literatuuronderzoek moet duidelijk worden op welke parameters gelet moet worden tijdens dit empirisch onderzoek. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste resultaten van dit literatuuronderzoek beschreven. Er zijn een drietal onderwerpen nader beschouwd; het asfalt en zijn mechanische eigenschappen, het verwerkingsproces van asfalt gericht op verdichting en de dichtheid van het asfaltmengsel en de temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting. Deze drie onderwerpen zijn in de achtereenvolgende paragrafen nader beschouwd met een beantwoording van de onderzoeksvragen. Uiteindelijk is een conclusie van het literatuuronderzoek beschreven met een lijst met parameters die belangrijk zijn in het empirisch onderzoek. In de appendix naast dit rapport is het uitgebreide literatuuronderzoek met het volledige onderzoeksmateriaal terug te vinden.

1.1 Het asfaltmengsel

1.1.1 Bouwstoffen van het asfaltmengsel

Een asfaltverharding is een flexibele wegverharding, dat wil zeggen dat de weg tot op zekere hoogte vervormingen in de ondergrond kan volgen zonder teveel schade op te lopen. Dit kan doordat het materiaal in een bepaalde mate elastisch en viskeus gedrag vertoont (Van der Velden, 2003)¹. Volgens VBW-asfalt (2000) kan een asfaltmengsel qua samenstelling worden onderverdeeld in twee delen; een deel van mineraal skelet en een deel voor de vulling van de holle ruimte in dat skelet. Het mineraal skelet kan worden opgebouwd uit grind, zand en/of steenslag en zorgt voor het dragend vermogen van het asfaltmengsel. De vulling wordt verzorgd door de mortel (bitumen + vulstof) of door mastiek (bitumen + vulstof + zand).

Volgens Van der Velden (2003)¹ bestaat een asfaltmengsel over het algemeen uit steen, zand, vulstof, bindmiddel en evt. recyclingmateriaal (oud asfalt).

Steen komt in asfalt voor als grind (natuurlijk en gebroken) en als gebroken natuursteen (steenslag). De korrels moeten groter zijn dan 2 mm. De grootte van de steenfractie in een asfaltmengsel wordt aangeduid met kleinste en grootste korrelafmeting. Niet alle gesteenten zijn geschikt voor de toepassing in asfalt; glimmer, zure en kleihoudende gesteenten zijn onbruikbaar. Het gesteente moet de grootste krachten kunnen verdragen. De krachtoverdracht verloopt van korrel op korrel, waarbij er grote contactdrukken kunnen optreden.

Het zand kan voor komen als natuurlijk zand (rivierzand, zeezand, bergzand, klapzand) of als bijproduct van steenbrekerijen of hoogovens. Het natuurlijke zand heeft overwegend een ronde korrelvorm en het afvalmateriaal (zgn. brekerzand) is met name scherp en hoekig. Het zand heeft een afmeting van 2 mm tot 63 μm . De zandkorrels worden ook blootgesteld aan hoge contactdrukken en moet dus een hoge weerstand tegen verbrijzelen bezitten.

Vulstoffen zijn fracties van zand waarbij de deeltjes kleiner zijn dan 63 μm . Dit wordt verkregen door drogen, zeven en malen. Bij het drogen van de in de asfaltinstallaties aangevoerde mineralen (zand en grind) verdwijnt een gedeelte van de kleinste deeltjes in het rookkanaal. Deze deeltjes (eigen stof) worden weer teruggenomen en gevoegd bij de kleinste zeeffractie (<63 μm).

¹ Het boek "Wegenbouw" van Van der Velden (2003) is een praktisch handboek en geen wetenschappelijke literatuur. Maar het is wel praktisch relevant, omdat het in veel opleidingen gebruikt wordt.

Fijn vulstof heeft een compacte samenstelling en dus weinig holle ruimte, waardoor het stof weinig bindmiddel kan vasthouden. Om dit bezwaar tegemoet te komen wordt het gemengd met kalksteen, kalkhydraat, en/of vliegasoorten, waardoor de gewenste vulstof kan worden gemaakt.

Bindmiddelen (bitumen) kunnen worden onderscheiden in natuurlijke bitumen en bitumen bereid uit aardolie (penetratiebitumen); asfaltbitumen, vloeibitumen, bitumenemulsies, gemodificeerde bitumen. Natuurlijke bitumen worden in Nederland niet toegepast. De penetratiebitumen worden in verschillende hardheden geleverd. Harde bitumensoorten zijn minder vervormbaar dan zachte bitumensoorten; met een zachte bitumen is minder bitumen nodig om de korrels te omhullen dan met harde bitumen. Voor de verwerking is een bepaalde viscositeit nodig welke afhangt van de temperatuur. Hardere bitumen moeten meer verwarmd worden om dezelfde viscositeit te verkrijgen dan zachtere bitumen. Een bepaalde viscositeit kan worden bereikt door het verwarmen van bitumen, het versnijden het bitumen met een verdunningsmateriaal of door het emulgeren van bitumen in water. Asfaltmengsels waarin verwarmde bitumen worden toegepast worden wereldwijd aangeduid met warm asfalt en de overige met koud asfalt (VBW-asfalt, 2000). Daarnaast zijn er een aantal speciale bitumensoorten. Vloeibitumen is een bitumensoort opgelost in een vluchtige olie (kerosine of gasolie). Hiervoor is warm weer nodig, zodat het verdampingsproces van het oplosmiddel sneller verloopt, waardoor de bitumen achter blijven. Asfaltbitumenemulsie bestaat uit een mengsel van water en zeer kleine deeltjes bitumen, welke zweven in het mengsel op het waterspanningsvlies. Gemodificeerde bitumen zijn bitumen met een bepaalde eigenschapverbetering. Meestal zijn dit chemische producten met als doel de hechting aan het materiaal te vergroten (vroeger was dit de functie van teer) of ze zorgen voor minder afdruipen van de bitumen van het mineraal tijdens het transport.

Een niet meer weg te denken bouwstof is het asfaltgranulaat. Asfaltgranulaat is oud asfalt dat onder andere geschikt is om te worden opgewerkt, in combinatie met nieuw materiaal, tot nieuw warm asfalt. Asfaltgranulaat komt vrij bij het frezen van oude asfaltverhardingen of wordt verkregen door het breken van schollen oud asfalt.

In het bijzonder zullen de bouwstoffen bitumen en vulstof vervolgens wat uitgebreider worden beschouwd, omdat de eigenschappen van de bitumen en de vulstof in hoge mate de eigenschappen van het asfaltmengsel bepalen.

1.1.1.1 Bitumen

De viscositeit van de bitumen is een eigenschap die van wezenlijk belang is voor het mengselgedrag tijdens de verwerking en in een later stadium voor het gedrag van de gereede asfaltverharding. Tijdens het mengproces in de asfaltinstallatie dient voor het bereiden van een goede, homogene menging een goede benutting van het minerale oppervlak de mortelviscositeit voldoende laag zijn. Tijdens de transportfase moet deze viscositeit echter zodanig hoog zijn dat ontmenging in de vorm van afdruipen van de mortel van het grovere aggregaat wordt voorkomen. Tijdens de verdichting moet voor het bereiken van een goed resultaat de viscositeit van de mortel in het gebruikelijke temperatuurtraject voldoende laag zijn (VBW-asfalt, 2000).

Mengsels met relatief weinig bitumen hebben in het algemeen een relatief hoge weerstand tegen blijvende vervorming. Omgekeerd is relatief weinig bitumen vaak aanzet tot optreden van materiaalverlies ten gevolge van onvoldoende cohesie van de mortel. Uiteindelijk zal een voortgaande degeneratie van het wegdek hiervan het gevolg zijn (gaten). Ook de vermoeiingseigenschappen van de asfaltmengsels worden minder; er zal eerder scheurvorming optreden. Naarmate de viscositeit lager wordt (relatief meer bitumen) neemt de mengselstijfheid af. Deze mengsels, over het algemeen dichter en vervorminggevoelige mengsels, zijn wegens hun duurzaamheid uitstekend geschikt voor toepassing in asfaltverhardingen waarop lagere verkeersbelastingen te verwachten zijn. Mengsels met relatief weinig bitumen zijn daarentegen wel vaak slecht verdichtbaar (een lage vloeivaarde bij de marshallproef) (VBW-asfalt, 2000).

Er moet dus naar een aanvaardbare tussenoplossing worden gezocht:

- Meer mortel: Dichtere mengsels, goede omhulling, minder kans op stripping, meer kans op vervormingen.
- Minder mortel: Meer holle ruimte, minder omhulling, meer kans op stripping, minder kans op vervormingen.

Bitumen kan afhankelijk van de bereidingswijze dik, vloeibaar tot vast zijn. Bij hoge temperaturen is bitumen een vloeistof, bij lage temperaturen is het hard en bros. Bitumen is daarmee een thermoplastisch materiaal. Bitumen hebben een goed hechtvermogen en is mede hierdoor een uitstekend wegebouw materiaal. Het gedrag onder belasting is zowel viskeus als elastisch en wordt sterk beïnvloed door de temperatuur en de duur van de belasting (VBW-asfalt, 2000).

Enkele eigenschappen van de bitumen 40/60, die in dit onderzoek zijn toegepast, zijn weergegeven in tabel 3.1 (VBW-asfalt, 2000).

Tabel 3.1: Eigenschappen bitumen 40/60 (VBW-asfalt, 2000)

Eigenschap	Bitumen 40/60
Penetratie bij 25 graden Celsius (0,1 mm)	40-60
Verwekingspunt (graden Celsius)	48-56
Penetratie-index	-1,5 - +0,7
Eigenschappen na veroudering	
- massaveroudering (%)	0,5
- penetratie na veroudering (0,1 mm)	50
- verwekingspunt na veroudering (graden Celsius)	49
Vlampunt (graden Celsius)	230
Oplosbaarheid (%)	99,0
Dynamische viscositeit bij 60 graden Celsius (mm ² /s)	175
Kinematische viscositeit bij 135 graden Celsius (mm ² /s)	325

Bitumen is een bijzondere stof, omdat het over een tamelijk beperkt temperatuurgebied (-25 graden Celsius tot +180 graden Celsius) een grote viscositeitsverandering vertoont (van 0,1 Pa.s tot 1010 Pa.s). Daarom is bitumen een goed wegebouw materiaal; het is bij 140-180 graden Celsius prima verwerkbaar en tussen de -25 en +70 graden Celsius levert het prima constructieve eigenschappen (VBW-asfalt, 2000).

1.1.1.2 Vulstof

Onder vulstof wordt in principe verstaan het mineraal aggregaat kleiner dan 63 µm. Van de vulstof is een bepaalde constantheid van de eigenschappen gewenst en deze is hoofdzakelijk afhankelijk van de korrelverdeling. Voor fabrieksvulstof worden eisen gesteld aan de zeefrest op de zeef 63 µm (tussen de 5 en 25%), op zeef 90 µm (tussen de 0 en 15%) en op zeef 2 mm (0%) (NEVUL, 2006).

Vulstof heeft op de volgende wijzen invloed op de mengselsamenstelling en de mengseleigenschappen (VBW-asfalt, 2000):

- Als materiaal vult het de holle ruimte in het steen-zand mengsel en vervolledigt als het ware de korrelverdeling van de het minerale aggregaat tot de aller kleinste afmetingen;
- Samen met het bitumen vormt de vulstof de zogenaamde mortel, die als het eigenlijk bindmiddel kan worden beschouwd. Bij een juiste vulstof en bitumenverhouding blijkt de hechting van de mortel aan het grove aggregaat drie maal zo groot als die van het bitumen alleen;
- Vulstof heeft een verstijvende werking op het bindmiddel. Hierdoor verbeterd het viskeuze gedrag van het bindmiddel waardoor de stabiliteit van het asfaltbetonmengsel wordt verhoogd.

Vulstoffen worden naar hun viscositeitsbeïnvloedend effect ingedeeld in de soorten zeer zwak, zwak en middelsoort. Deze vulstofsterkte (opneemvermogen van bitumen) is een vulstofeigenschap die bepaald wordt door de korrelgrootte en de aard van het korreloppervlak van de vulstofkorrels (NEVUL, 2006).

In NEN-3975 wordt het opneemvermogen van de vulstof op twee manieren gekarakteriseerd:

- Door het bitumengetal, d.w.z. de hoeveelheid water in millimeters die nodig is om een vulstof/watermengsel een bepaalde viscositeit te geven;
- Door de holle ruimte van een droog verdicht monster vulstof, verdicht volgens de methode van Rigden.

Zwakke vulstof wordt het meest gebruikt en wordt toegepast in STAB, GAB, OAB, DAB en in SMA. Middelsoort mag in OAB en DAB worden toegepast indien bepaalde mengseleigenschappen dit wenselijk maken. In ZOAB is middelsoort vulstof met hydroxide zelfs voorgeschreven, t.b.v. de weerstand tegen stripping (NEVUL, 2006).

Zwelling en watergevoeligheid zijn vulstofeigenschappen die, wanneer zij in sterke mate voorkomen, verstrekkende gevolgen hebben voor de kwaliteit van de desbetreffende asfaltmengsels. Een voor zwelling gevoelige vulstof is in staat water op te nemen en op te zwellen, gepaard met een volumevergroting, waardoor de samenhang van het asfalt verloren gaat, waardoor de stabiliteit achteruitgaat. Vulstoffen zijn alle in meer of mindere mate watergevoelig. Dit is te wijten aan hun chemische samenstelling, waardoor de vulstof hydrofiele eigenschappen bezit. Dit houdt in dat de vulstofkorrels een grotere affiniteit hebben voor water dan voor bitumen. Dit uit zich dan in verdringing van het aanwezige bitumenhuidje aan het korreloppervlak (stripping). Een grotere watergevoeligheid van vulstof kan schade aan het wegdek veroorzaken (NEVUL, 2006).

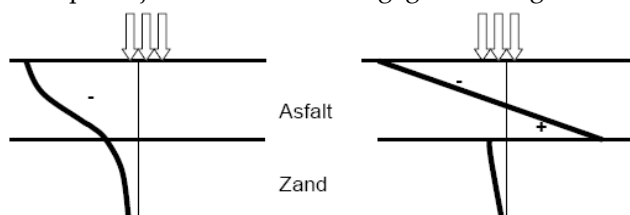
In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van Wigras 40K, hetgeen een zwakke vulstof is. In tabel 3.2 zijn de eigenschappen van deze vulstof weergegeven.

Tabel 3.2: Eigenschappen Wigras 40K (NEVUL, 2006)

Eigenschap	Wigras 40K
Producent	Ankerpoort Winterswijk
Plaats van fabricage	Winterswijk
Leverancier	Ankerpoort Winterswijk
Zeefdoorval (% of m/m)	
0,125 mm	87 - 97
0,063 mm	77 - 87
Bitumengetal	44 - 50
Holle ruimte (% of V/V)	41 - 45
Dichtheid (Mg/m ³)	2,48 - 2,68
Gehalte calciumhydroxide	Ka5
Samenstelling (% of m/m)	Primair 20 - 45 Secundair 50 - 75 Kalkhydraat 5 - 15

1.1.2 Soorten asfaltmengsels

De verticale (links) en horizontale (rechts) spanningscondities waaraan een asfaltverharding zijn onderworpen zijn schematisch weergegeven in figuur 3.1.



Figuur 3.1: Verticaal (links) en horizontaal (rechts) spanningsoverloop in een wegconstructie (Molenaar en Houben, 2003)

In deze figuur is te zien dat de onderkant van de asfaltverharding grote horizontale spanningen op moet kunnen vangen en vooral op vermoeiing wordt belast, het midden van de asfaltverharding grote deviatorspanningen kunnen ontstaan en dus vooral weerstand tegen permanente deformatie moet hebben, hetgeen ook geldt voor de bovenkant van de asfaltverharding. Verder dient de bovenkant van de verharding een bepaalde duurzaamheid en stroefheid te bezitten. Wegens deze verschillende spanningen en eisen zijn er verschillende asfaltmengsels ontwikkeld (Molenaar en Houben, 2003).

De meest bekende, en inmiddels klassieke, mengsels zijn:

- Dichtasfaltbeton (DAB);
- Open asfaltbeton (OAB);
- Steenslagasfaltbeton (STAB);
- Zeer open asfaltbeton (ZOAB);
- Steenmastiakasfalt (SMA).

DAB bestaat voornamelijk uit gebroken materiaal (wegens spoorvormingsweerstand en stroefheid) met relatief weinig holle ruimte en een hoog bitumengehalte (volgens het betonprincipe). OAB bestaat ook uit gebroken materiaal en heeft een lager bitumengehalte dan DAB. Ook STAB bestaat uit gebroken materiaal en een relatief laag bitumengehalte. ZOAB is een discontinu gegradeerd mengsel met een kleine zandfractie, een laag bitumengehalte en veel holle ruimte. ZOAB heeft een goede weerstand tegen permanente deformatie. SMA heeft een hoog bitumengehalte en veel klein aggregaat. Daarmee heeft SMA een relatief hoge weerstand tegen vermoeiing.

Bij de asfaltmengsels zijn volgens VBW-asfalt (2000) drie typen te onderscheiden; ondervulde mengsels, gevulde mengsels en overvulde mengsels. Bij ondervulde mengsels is de holle ruimte in het mineraal skelet niet volledig gevuld, oftewel de poriën staan met elkaar in open verbinding (bv. ZOAB). Bij gevulde mengsels vormen het grove mineraal nog juist het skelet, maar de holle ruimte is vrijwel geheel gevuld met mortel of mastiek, waardoor er weinig holle ruimte aanwezig is en de poriën niet met elkaar in verbinding staan (DAB, SMA). Bij overvulde mengsels is meer mortel aanwezig dan in het skelet kan worden geborgen, waardoor de skeletdelen uit elkaar worden gedrukt en gaan drijven in het vulmateriaal, waardoor deze het dragend vermogen overneemt (gietasfalt) (VBW-asfalt, 2000). Over de verschillende asfaltmengsels is in de loop der tijd veel geschreven in de literatuur. In dit verslag is hierop niet verder ingegaan. Voor meer informatie over de verschillende asfaltmengsels wordt verwezen naar VBW-asfalt (2000), Molenaar en Houben (2003) en Van der Velden (2003).

In dit onderzoek is de voorkeur uitgegaan naar dichte mengsels, omdat deze relatief het makkelijkst te onderzoeken zijn (i.v.m. holle ruimte) en relatief weinig variabiliteit vertonen. In dit onderzoek is er voor gekozen om onderzoek te doen naar een STAB 0/16 mengsel, omdat dit mengsel veel gebruikt wordt en omdat dit het meest aangelegd wordt onder kritische (minder ideale) omstandigheden. Dit mengsel zal zonder regeneratieasfalt worden gemaakt om een grote variabiliteit in de mengsels te voorkomen.

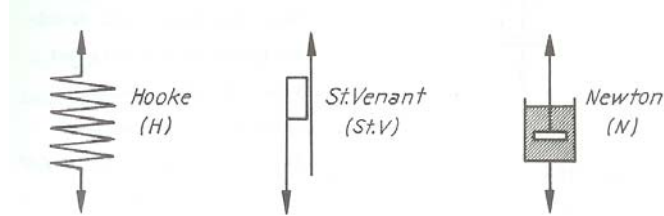
1.1.3 Gedrag van asfaltmengsels

Asfalt is een visco-elastisch materiaal en ontleent dit gedrag aan het bindmiddel, de bitumen. Een stof is visco-elastisch als deze tegelijkertijd kenmerken van elastisch en viskeus spanning-rekgedrag vertoont. Welk gedrag overheerst hangt af van de tijd waarin de belasting aanwezig is; bij een korte belastingstijd overheerst elastisch gedrag, bij een lange belastingstijd overheerst het viskeuze gedrag (VBW-asfalt, 2000).

De eigenschappen en karakteristieken van het asfaltmengsel zullen volgens de rheologie (de wetenschap van vervloeiing en deformatie van materialen) worden beschreven.

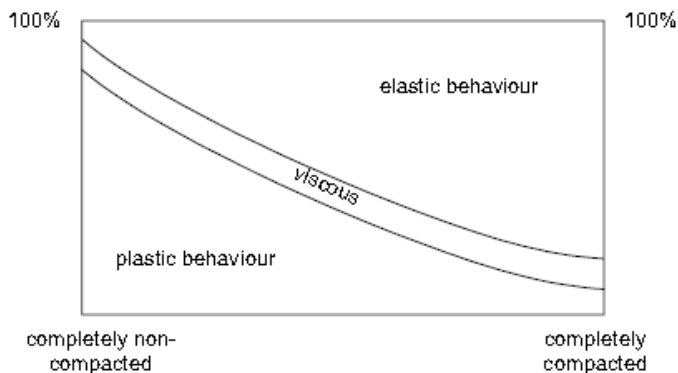
Volgens het tweede axioma van de rheologie is elk materiaal elastisch, viskeus en plastisch. Deze gedragingen zijn weergegeven in figuur 3.2. Van elastisch (model van Hooke) wordt gesproken bij een

vervorming zonder tijdsvertraging door een belasting en als de belasting weggenomen wordt een even grote terugvervorming plaatsvindt (oftewel de vervorming wordt volledig weggenomen) zonder tijdsvertraging (als een veer). Van viskeus (model van Newton) wordt gesproken bij een vervorming door een belasting, waarbij na het wegnemen van de kracht slechts een deel van de vervorming blijvend is (als een schokdemper). Plasticiteit (model van St. Venant) is een maat voor de weerstand tegen vervorming ten gevolge van de schuifspanning (Figge, 1987).



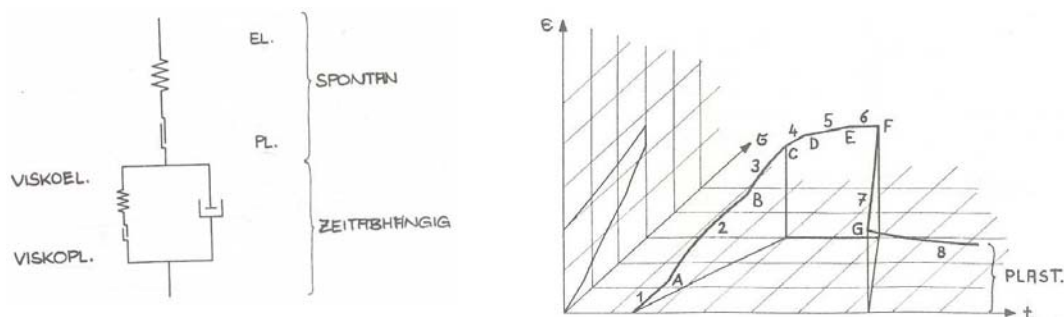
Figuur 3.2: Elastisch, plastisch en viskeus (Krass, 1971)

Voor de onafhankelijke materialen van het asfaltmengsel geldt; het mineraal skelet gedraagt zich overwegend elastisch-plastisch en de bitumen gedragen zich overwegend viskeus en elastisch (tijdens verdichting). Het materiaalgedrag van asfalt tijdens verdichting kan volgens Ter Huerne (2004) worden gekarakteriseerd als elastisch (totdat de korrels gaan schuiven) en plastisch (tijdens het schuiven). Figge (1987) heeft onderzoek gedaan naar de rheologische eigenschappen van het asfaltmengsel (zie figuur 3.3). Hierin wordt geconcludeerd dat het gedrag van het asfaltmengsel aan het begin van de verdichting met name plastisch-viskeus is. Tijdens de verdichting verandert dit gedrag in overwegend elastisch-viskeus gedrag. De mate van viskeus gedrag blijft tijdens de gehele verdichting nagenoeg gelijk (Figge, 1987).



Figuur 3.3: Rheologische fasen asfaltverdichting (Figge, 1987)

Voor het gedrag van asfaltmengsels tijdens verdichting heeft Krass (1971) een 5-parametermodel ontwikkeld (zie figuur 3.4). Wetenschappelijk gezien (mathematisch) kan dit model de dichtheidsprogressie niet precies beschrijven, maar het beschrijft wel goed de rheologische fasen die het asfaltmengsel tijdens verdichting ondergaat (Krass, 1971).



Figuur 3.4: 5-parametermodel Krass (1971)

Het model begint lineair en/of degressief (bij een progressieve vering) bij een toenemende belasting (lijn 1). Al vrij snel wordt punt A bereikt, welke als spontaan-elastisch kan worden beschreven. Bij lijn 2 ontstaat er wrijving en begint het materiaal ook visco-elastisch te worden. Bij punt B vinden vrijwel alleen visco-plastische gedragingen plaats. Wanneer de kracht gelijk gehouden wordt (tussen punt C en F) vindt een verdere vervorming plaats. Op lijn 4 vindt met name visco-plastisch gedrag plaats, op lijn 5 met name spontaan-plastisch gedrag en op lijn 6 met name visco-elastisch gedrag. Na het wegnemen van de belasting (punt G) vindt een visco-elastische vervorming plaats (voor een oneindige tijd). Er blijft een materiaal met spontaan-plastisch en visco-plastisch materiaal.

1.1.4 Mechanische eigenschappen

Asfaltmengsels moeten bepaalde eigenschappen hebben om aan de eisen te kunnen voldoen die gesteld worden uit vervormings-, scheurvormings- en duurzaamheidsoverwegingen (Molenaar en Houben, 2003). VBW-asfalt (2005) geeft een veelheid aan schadebeelden, zoals rafeling, vetslaan, onvlakheid, scheuren, gaten etc., maar hiervan zijn bij de dimensionering over het algemeen maar een tweetal kritisch en dat zijn de permanente vervorming (spoorvorming) en scheurvorming (vermoeding). Deze zullen achtereenvolgens worden beschouwd, waarna de mechanische proeven om deze eigenschappen te bepalen worden beschreven.

1.1.4.1 Vervorming

Een belangrijk schadebeeld is permanente vervorming van de lagen die zich in de rijsporen uitten als spoorvorming. Deze spoorvorming is het gevolg van visco-plastische deformatie van de asfaltlagen en plastische deformatie van de ongebonden fundering en ondergrond. Het is dus van belang om het spanningsniveau in alle lagen voldoende laag te houden om permanente vervorming te voorkomen en dus voldoende weerstand tegen permanente vormverandering. Als ontwerpcriterium wordt veelal gekozen dat wanneer de elastische deformatie aan de bovenkant van de ondergrond beneden een bepaald niveau blijft ook de permanente vormverandering beperkt zal blijven (Molenaar en Houben, 2003).

Om een zo hoog mogelijke weerstand tegen blijvende vormverandering te hebben dienen mengsels een dusdanige korrelopbouw te hebben dat de schuifweerstand van het mineraal aggregaat zo hoog mogelijk is (veelal een dichte pakking), mineraal met een hoge haakweerstand, zo weinig mogelijk bitumen bevatten en bitumen die weinig gevoelig zijn voor variaties in temperatuur en belastingtijd. Om een zo groot mogelijk lastspreidend vermogen te hebben is het wenselijk dat asfaltmengsels een hoge stijfheid (elasticiteitsmodulus) hebben. Een hoge stijfheid wordt bereikt door zo weinig mogelijk holle ruimte, zo weinig mogelijk bitumen en door een goede hechting tussen de bitumineuze mortel en het mineraal aggregaat. Volgens Shell wordt de mengselstijfheid bepaald door de stijfheid van de bitumen en de volumetrische samenstelling. Voor de dichte, klassieke, mengsels kan over het algemeen gesteld worden dat een mengsel met een hoge elastische stijfheid ook een hoge weerstand tegen permanente deformatie heeft (Molenaar en Houben, 2003).

Het voorspellen van optredende spoorvorming is een complexe zaak. Daarom bestaat er ook geen nomogram om de weerstand tegen permanente deformatie te voorspellen. Wel heeft Shell een spoorvormingmodel gemaakt ervan uitgaande dat de blijvende vervorming bepaald wordt door de viskeuze vervorming van het mengsel. Er ontstaan echter ook (vertraagd) elastische vervormingen en eventueel plastische deformatie van het korrelskelet plaats waar het model geen rekening mee houdt (Molenaar en Houben, 2003).

1.1.4.2 Scheurvorming / vermoeiing

Scheurvorming en vermoeiing zijn nauw verwante fenomenen. Vermoeiing houdt in het ontstaan van scheurvorming als gevolg van herhaald optredende belastingen. De vermoeiingsweerstand wordt positief beïnvloed door een toenemend bitumengehalte, een afnemende holle ruimte en een goede hechting tussen de korrels en de mortel (Molenaar en Houben, 2003).

Het schadebeeld scheurvorming kan grotendeels in drie categorieën worden opgedeeld; craquelé, langsscheuren en krimpscheuren.

Craquelé treedt op in een asfaltlaag op een ongebonden fundering waarbij rekken en trekspanningen ten gevolge van de doorbuiging van de constructie optreden. Deze rekken en trekspanningen kunnen, nadat ze een groot aantal keren zijn opgetreden, leiden tot vermoeiingsscheurvorming. Deze scheurvorming (die zich onderin de laag initieert) plant zich voort naar boven om uiteindelijk aan het oppervlak en in de wielsporen zichtbaar te worden in de vorm van craquelé.

Daarnaast treden er ook langsscheuren in de wielsporen op. Deze blijken niet dieper te gaan dan 50 mm. Over de oorzaak en voortplanting van deze scheurvorming is nog veel onduidelijkheid, maar wel is duidelijk dat ze ontstaan als gevolg van de complexe contactspanningsverdeling die optreedt, waarbij ook horizontale schuifspanning optreden. Normaal worden deze spanningen verwaarloosd, waardoor analyse van de langsscheuren lastig is. De voortplanting is waarschijnlijk het gevolg van verkeers- en klimaatinvloeden.

Krimpscheuren ontstaan bij asfaltlagen op (cement) gebonden funderingen, waarbij het gebonden materiaal, bij het verhard en afkoelen, wil krimpen, waardoor trekspanningen ontstaan met krimp-scheurvorming als gevolg. Dit effect kan worden beperkt door de scheurafstand in het gebonden materiaal te reguleren door kerven aan te brengen, waardoor het materiaal bij deze verzwakkingen kan krimpen (Molenaar en Houben, 2003).

1.1.4.3 Proeven

Er zijn verschillende proeven om de mechanische kwaliteit van asfaltproefstukken te bepalen. Volgens VBW-asfalt (2001) kunnen de scheurgevoeligheid (spleetproef), vermoeiing (vierpuntsbuigproef), viskeuze vervorming (triaxiaalproef), stijfheid (vierpuntsbuigproef) en de treksterkte, scheurgroei (SCB-test) door functionele proeven bepaald worden (VBW-asfalt, 2001).

Er is gekozen voor een spleet- en een triaxiaalproef om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden hiermee worden afgedekt, de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen.

Bij de spleetproef ontwikkelt zich in het proefstuk een trekspanning loodrecht op de richting van de belasting. De berekende spanning waarbij het proefstuk bezwijkt is een benadering van de treksterkte. Tijdens deze proef wordt de belastingsvervormingscurve gemeten, waaruit de maximale kracht en de vloeï kunnen worden bepaald. Met de spleetproef kan de spleetsterkte en scheurtaaiheid van asfaltproefstukken worden vastgesteld bij verschillende temperaturen (VBW-asfalt, 2001). Deze proef zal in dit onderzoek gedaan worden met een 50 kN testbank met een speciaal hulpstuk (figuur 3.5).

Bij de triaxiaalproef (triaxiale drukproef) wordt rondom het proefstuk een belasting (steundruk) aangebracht. In verticale richting wordt het proefstuk cyclisch belast. Het verloop van de verticale vervorming is een maat voor de gevoeligheid tegen viskeuze vervorming (spoorvorming) (VBW-asfalt, 2001). Deze proef zal in dit onderzoek worden gedaan met de Nottingham Asphalt Tester (NAT) (figuur 3.6).



Figuur 3.6: Triaxiale drukproef



Figuur 3.5: Slijtproef

Recasens et al (2000) hebben onderzoek gedaan naar kwaliteitscriteria voor het eindproduct (asfaltweg) gebaseerd op de mechanische eigenschappen. In dat onderzoek is het effect van verdichtings-temperatuur en verdichtingsenergie op de dichtheid en de indirecte treksterkte onderzocht, waarbij verdicht is met de Marshallhamer. Hierbij is bij een tweetal temperaturen verdicht, 120 °C en 150 °C, waarbij het verschil in dichtheid nihil was, maar de mengsels verdicht bij 150 °C hadden gemiddeld een hogere treksterkte van 6-7 kg/cm². Ook is er een duidelijke relatie te zien tussen de verdichtings-energie (het aantal Marshallslagen) en de treksterkte; hoe meer verdichtingslagen (binnen een range van 25 en 75 slagen) des te meer treksterkte (Recasens et al., 2000).

Daarnaast is ook het effect van het bitumengehalte op de indirecte treksterkte onderzocht. Hieruit wordt geconcludeerd dat een verschil van 1% bitumengehalte tot een verschil van 6-7 kg/cm² aan treksterkte kan leiden. Dit betekent dat de indirecte treksterkte gevoeliger is voor een verschil in bitumengehalte dan een verschil in dichtheid.

Recasens et al (2000) hebben een model ontwikkeld om de kwaliteit van het asfalt te bepalen. Dit model is weergegeven in formule 3.1 (Recasens et al, 2000).

$$Q_f = (S_s - (100 - C) \cdot b) - S_c \quad \text{F3.1}$$

Waarbij:

Q_f = kwaliteitsfactor

S_s = gemiddelde sterkte van het mengsel

C = percentage van de benodigde verdichting

b = helling van de correlatie tussen de sterkte en de dichtheid

S_c = gemiddelde sterkte van de kernen

Recasens et al (2000) geven aan dat de indirecte treksterkte een efficiëntere parameter is om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

1.1.5 Conclusies

De conclusie is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.1 en deze onderzoeksvraag is in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.1:

Wat is asfalt en welke materiaaleigenschappen heeft een asfaltmengsel betreffende de verdichting?

Volgens Van der Velden (2003) bestaat een asfaltmengsel over het algemeen uit steen, zand, vulstof, bindmiddel en evt. recyclingmateriaal (oud asfalt). Hierbij dient het gesteente en het zand een hoog dragend vermogen te hebben en een goede weerstand tegen verbrijzeling. Het bindmiddel (de bitumen) dient een goed hechtend vermogen te hebben. Een asfaltverharding dient tot op zekere hoogte vervormingen aan te kunnen zonder teveel schade op te lopen.

Er bestaan verschillende asfaltmengsels om te voldoen aan verschillende eisen voortvloeiende uit vervormings- scheurvormings- en duurzaamheidsoverwegingen. In dit onderzoek is er voor gekozen om onderzoek te doen naar een STAB 0/16 mengsel (steenslagasfaltbeton), omdat dit mengsel veel gebruikt wordt en omdat dit het meest aangelegd wordt onder kritische (minder ideale) omstandigheden. Dit mengsel zal zonder regeneratieasfalt (PR) worden gemaakt om een grote variabiliteit in de mengsels te voorkomen. Omdat de viscositeit van het asfaltmengsel erg belangrijk is voor de prestaties van het asfaltmengsel zal in dit onderzoek ook de herhaalbaarheid van de viscositeit van de bitumen worden onderzocht door een penetratieproef en een ring&kogelproef.

Het asfaltmengsel is een visco-elastisch materiaal en heeft dus het gedrag kenmerken van elastisch en viskeus spanning-rekgedrag. Welk gedrag overheerst hangt af van de tijd waarin de belasting aanwezig is; bij een korte belastingtijd overheerst elastisch gedrag, bij een lange belastingtijd overheerst het viskeuze gedrag (VBW-asfalt, 2000).

Voor de onafhankelijke materialen van het asfaltmengsel geldt; het mineraal skelet gedraagt zich overwegend elastisch-plastisch en de bitumen gedragen zich overwegend viskeus en elastisch (tijdens verdichting). Het materiaalgedrag van asfalt tijdens verdichting kan volgens Ter Huerne (2004) worden gekarakteriseerd als elastisch (totdat de korrels gaan schuiven) en plastisch (tijdens het schuiven). Figge (1987) heeft onderzoek gedaan naar de rheologische eigenschappen van het asfaltmengsel en concludeert dat het gedrag van het asfaltmengsel aan het begin van de verdichting met name plastisch-viskeus is, tijdens de verdichting verandert dit gedrag in overwegend elastisch-viskeus gedrag, waarbij de mate van viskeus gedrag tijdens de gehele verdichting nagenoeg gelijk blijft.

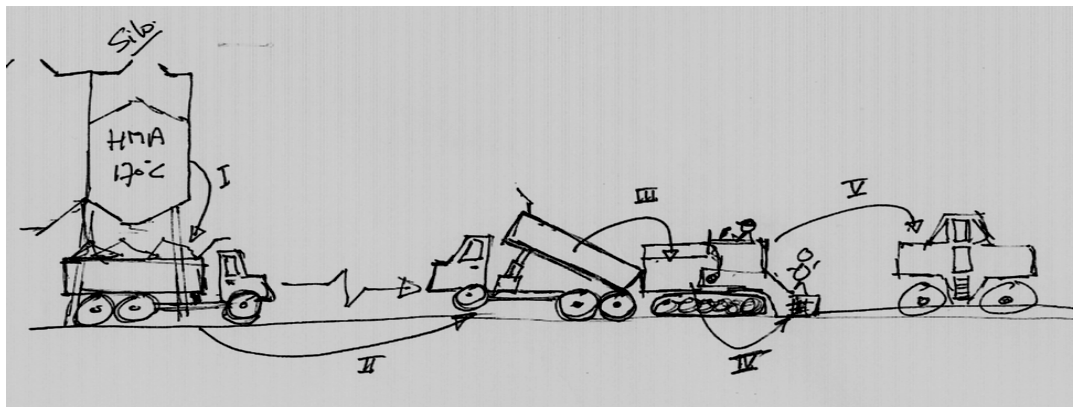
Zoals alle materialen heeft het asfaltmengsel kenmerken van elastisch, plastisch en viskeus gedrag. Afhankelijk van het moment tijdens verdichting kunnen bepaalde gedragingen overheersen. In dit afstudeeronderzoek is gefocust op het verdichtingsproces met de walsen, dus na voorverdichting met de balk en in deze fase is het asfaltmengsel al grotendeels verdicht. Het asfaltmengsel is daarom met name beschouwd als een mengsel met visco-elastisch gedrag. In het empirisch onderzoek dient er dus rekening mee gehouden te worden dat het asfaltmengsel visco-elastisch gedrag vertoont en dat er een elastisch effect plaats kan vinden na het verdichten, zonder dat deze direct geregistreerd wordt.

Om te voldoen aan eisen voortvloeiende uit vervormings- scheurvormings- en duurzaamheidsoverwegingen dienen asfaltmengsels bepaalde mechanische eigenschappen te hebben, zoals weerstand tegen scheurgroei, weerstand tegen vermoeiing, weerstand tegen viskeuze vervorming, stijfheid, etc. Recasens et al (2000) hebben onderzoek gedaan naar kwaliteitscriteria voor het eindproduct (asfaltweg) gebaseerd op de mechanische eigenschappen. Recasens et al (2000) geven aan dat de indirecte treksterkte een efficiëntere parameter is om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten. In dit onderzoek zal getoetst worden of dit ook voor Nederlandse asfaltmengsels geldt.

In dit onderzoek is gekozen om de mechanische eigenschappen te bepalen met een slijt- en een triaxiaalproef om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden voor onderlagen hiermee worden afgedekt (STAB), de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen.

1.2 Het verwerkingsproces

Het asfaltverwerkingsproces kan volgens Ter Huerne (2004) worden opgedeeld in (1) het maken en verwerken van het asfalt bij de asfaltcentrale, (2) de logistiek richting de bouwplaats, (3) het plaatsen van het asfalt uit de asfaltvrachtwagen in de hopper van de verwerkingsmachine, (4) de verwerking van het asfalmengsel tot een asfaltlaag en (5) de verdichting van het asfalt. Dit is versimpeld weergegeven in figuur 3.7.



Figuur 3.7: Het asfaltverwerkingsproces in versimpelde weergave (Ter Huerne, 2006)

In dit onderzoek worden alleen de laatste twee fasen beschouwd, de verwerking van het asfalmengsel (in de vorm van voorverdichting door de balk) en de verdichting met de wals. De asfaltafwerkmaschine brengt het asfalt vlak, onder profiel en in de juiste dikte aan en voorverdicht daarmee het asfalt. Het walsen zorgt voor de verdere verdichting (VBW-asfalt, 2003).

Het verdichten van asfalt vindt plaats door er van boven op te drukken. Een materiaal waarop gedrukt wordt wil in principe in alle richtingen vervormen. De vervorming wordt tegengegaan door (Van Stek en Linden, 1992):

- De tegendruk (opgesloten zijn): Onder een belasting kan het asfalt vervormen. Het bitumen speelt hierbij een grote rol, omdat de bitumen zich visco-elastisch gedragen. Als het asfalt warmer wordt verwerkt, heeft het bitumen een lagere viscositeit, zodat het asfalt gemakkelijker (blijvend) vervormd;
- De inwendige samenhang: De weerstand tegen blijvende vervorming (verdichten) van het asfalt wordt door de inwendige afschuifbaarheid van asfalt bepaald. Dit wordt beïnvloed door de horizontale en verticale opsluiting en door de inwendige samenhang. Dit komt tot stand door inwendige wrijving van de skeletdeeltjes ten opzichte van elkaar en door de stijfheid van het bindmiddel, de mortel. De samenstelling van het asfalt speelt de grootste rol in het opvangen van een verticale kracht.

In deze paragraaf is ten eerste ingegaan op het aspect dichtheid en achtereenvolgens zullen de asfaltverwerkingsfase en de verdichtingsfase met de wals worden beschreven. Vervolgens zullen de fasen die het asfalmengsel tijdens het verdichten doormaakt worden beschouwd. Als laatste zullen een aantal verdichtingsmethoden en procedures worden beschouwd.

1.2.1 Dichtheid van het asfaltmengsel

Het asfaltmengsel bestaat uit vaste deeltjes, bitumen en poriën gevuld met lucht (Ter Huerne, 2004). De bitumen zorgen ervoor dat de minerale deeltjes aan elkaar worden gebonden. Afhankelijk van het soort mineraal en bitumen is het asfalt makkelijker of moeilijker te verdichten (VBW-asfalt, 2003). Om het asfalt belastingen succesvol te laten dragen met weinig deformatie als gevolg is het nodig om het materiaal nader tot elkaar te brengen. Om dit te bereiken is het nodig om te korrels te rangschikken en lucht uit te drijven. Dit proces is bekend als verdichting (Ter Huerne, 2004).

Ter Huerne (2004) geeft meerdere definities voor de dichtheid aan; het volumepercentage holle ruimte gerelateerd aan het volume van het totale materiaal, hoeveel massa in een bepaald volume aanwezig is, de hoeveelheid 'ruimte' in het mineraalskelet, het volume van de holle ruimte in het steenskelet plus het volume van de vloeistof in het materiaal gerelateerd aan het volume van het materiaal. Ter Huerne (2004) gebruikt 'de hoeveelheid ruimte in het mineraalskelet gerelateerd aan het volume van het materiaal', omdat deze definitie de korreldichtheid goed benaderd en niet afhankelijk is van het bitumenpercentage of percentage holle ruimte.

Van der Velden (2003) definieert de dichtheid als de mate waarin de korrels in elkaar passen. Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen, de vochtigheidsgraad en de kracht die uitgeoefend wordt op de korrels (Van der Velden, 2003).

De gradatie is de verdeling van de grootte van de korrels en de hoeveelheid van de verschillende korrelafmetingen. Door het materiaal te zeven kan inzicht worden gekregen in de gradatie. Als de korrelgrootten regelmatig over de totale hoeveelheid zijn verdeeld, kan het materiaal relatief goed verdicht worden. Als een bepaalde grootte overheerst is de verdichting over het algemeen minder goed.

Naarmate de korrels groter worden kan verdichting eveneens achteruitlopen. Ook de vorm van de materiaaldeeltjes is van invloed op de dichtheid; hoekige en scherpe deeltjes geven een stabielere opbouw dan ronde materiaaldeeltjes van dezelfde grootte, omdat ronde deeltjes van elkaar afschuiven en hoekige deeltjes blijven achter elkaar haken.

De hoeveelheid vloeistof rond de materiaaldeeltjes is van grote invloed op de dichtheid. De vloeistof dient tijdens het verdichten als smeermiddel om de deeltjes met minder wrijving langs elkaar te doen schuiven. De hoeveelheid vloeistof mag niet groter zijn dan de hoeveelheid lucht (holle ruimte in verdichte toestand), omdat er dan vloeistof tussen de deeltjes blijft, waardoor de korrels elkaar niet raken, zodat de vloeistof onder spanning komt te staan i.p.v. de korrels die de belastingen moeten dragen.

De optimale hoeveelheid vloeistof verschilt per mineraalsoort; naarmate de deeltjes kleiner zijn, wordt de hoeveelheid vloeistof belangrijker. Volgens Van Stek en Linden (1992) moet bij het verdichten de vloeistof (mortel, bitumen) niet te stijf zijn, omdat dan de overtollige lucht niet kan worden uitgedreven, zodat een verend effect kan ontstaan. Ook moet deze niet te slap zijn, omdat de vloeistof dan met de lucht uitgedreven kan worden, waardoor het oppervlak vet slaat.

De uitgeoefende kracht is een energie die nodig is om het materiaal te verdichten. Deze energie kan geleverd worden door drukkracht, slagkracht, trilling en menging. Drukkracht is een naar beneden gerichte kracht. Het materiaal onder de plaats waar de drukkracht wordt uitgeoefend, wordt samengedrukt, waardoor de dichtheid toeneemt. Slagkracht en trilling zijn nauw aan elkaar verwant. Slagkracht zijn slagen met een frequentie van 50-500 per minuut en bij trilling is de frequentie 900-2400 slagen per minuut. Bij menging worden verschillende oppervlaktedrukken gecreëerd, waardoor een knedende werking ontstaat die nodig is om de deeltjes in elkaar te laten schuiven.

Om een goede dichtheid te bereiken moet het steenskelet verder in elkaar worden gedrukt. Dit kan alleen worden bereikt (zonder dat er ontmenging ontstaat) als de overtollige lucht uit het mengsel wordt gedreven (Van Stek en Linden, 1992). Door een initieel relatief onverdicht materiaal te belasten verandert de korrelrangschikking (de dichtheid van het deeltjesskelet) en hierdoor wordt de lucht uitgedreven. Het specifieke volume van het materiaal verandert en de dichtheid van het materiaal neemt toe. De vloeistof in het mengsel "smeert" de contactvlakken tussen de korrels en maakt het

schuiven van de korrels ten opzichte van elkaar lichter (Ter Huerne, 2004). Als het asfaltmengsel te veel verdicht wordt, is er geen of te weinig holle ruimte (lucht) aanwezig, waardoor het asfalt overvuld raakt en daarmee kan het asfaltmengsel in bepaalde situaties zijn stabiliteit verliezen (Van Stek en Linden, 1992).

Asfalt wordt dus in principe verdicht door er van boven op te drukken. Voor een goede korrelrangschikking is dat echter niet altijd voldoende (m.n. bij steenrijke mengsels). Volgens Van Stek en Linden (1992) zijn bij steenrijke mengsels vaak ook horizontale krachten nodig om de gewenste korrelrangschikking te bereiken. Deze horizontale spanningen ontstaan door het verticaal belasten van het materiaal, waardoor het materiaal horizontaal wil vervormen. Door verschillen in horizontale (opsluit)spanningen en verticale spanningen ontstaan schuifspanningen. Door variatie in de schuifspanning ten opzichte van de verticale belasting ontstaat een knedende werking van het asfaltmengsel. Bij onvoldoende opsluiting van het asfalt, kan dit door de wals worden verplaatst, met het uitwalsen van het asfalt als gevolg (Van Stek en Linden, 1992).

Daarnaast geven Van Stek en Linden (1992) aan dat de verticale drukken kunnen worden beperkt door de maximale spanning die mag optreden in het asfalt. Deze spanning die optreedt wordt bepaald door de grootte van het draagvlak. Het draagvlak wordt kleiner bij een grotere mortelstijfheid, waardoor de optredende spanning groter wordt.

Een balk van een afwerkmaschine en een walsrol drukken niet alleen in verticale, maar ook horizontale richting tegen de bovenkant van de asfaltlaag. Als de resulterende kracht te horizontaal gericht is, wordt de oppervlaktelaag inwendig afgeschoven, als de horizontale opsluiting niet voldoende is. Op de plaats waar het asfalt door de strijkbeweging niet teveel wordt meegenomen, maar blijft liggen door voldoende opsluiting, ontstaat stuwdruk. De resulterende kracht is daar meer verticaal gericht en het asfalt zal door stuwing worden samengedrukt (Van Stek en Linden, 1992).

In de praktijk is gebleken dat in de Nederlandse bouwpraktijk de walsen voldoende kracht uitoefenen om het gewenste verdichtingseffect te bereiken. Maatgevend voor het verdichtend effect is dan ook de horizontale kracht (Van Stek en Linden, 1992).

Geconcludeerd kan worden dat het asfaltmengsel dus niet alleen uit korrels bestaat, maar ook uit vloeistof en lucht, waarmee in het onderzoek rekening gehouden dient te worden. Factoren die bij de dichtheid in de gaten gehouden dienen te worden zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen, de vochtigheidsgraad en de kracht die uitgeoefend wordt op de korrels. Om dit te bereiken zullen de mengsels volgens de RAW Standaard en de richtlijnen van Ooms worden bereid.

Om een bepaalde dichtheid in het onderzoek te verkrijgen dient op het mengsel te worden gedrukt, zodat lucht uitgedreven wordt. Bij het verdichten dient rekening te worden gehouden dat er horizontale en verticale krachten nodig zijn. Daarnaast dient te worden gelet op het opsluitend effect dat nodig is om te verdichten.

1.2.2 Asfaltverwerking

Tijdens de asfaltverwerking wordt het mengsel verwerkt tot asfaltlaag door de asfaltverwerkingsmaschine (en voorverdicht door middel van de balk). De verwerkingsmaschine stuwt het asfalt door naar de spreidwormen en deze verdelen het asfalt over de weg en stuwen tegen de geleideplaat. De verwerkingsmaschine trekt met zijn trekarmen de strijkplaat mee, waardoor het asfalt glad getrokken wordt. Vervolgens wordt de laag voorverdicht door stampmessen of door een trilbalk. Voor het verdichten van het asfalt is het van belang dat de spreidwormen zorgen voor een constante stuwdruk van het mengsel over de volle breedte van de geleideplaat (Van der Velden, 2003). Volgens Van Stek en Linden (1992) is hierbij de snelheid van de afwerkmaschine van belang. De snelheid waarmee over het asfalt gestreken wordt, geeft een verandering in het opsluitend effect van het warme asfalt. Bij een lage snelheid is de horizontale component in het krachtenstelsel die veroorzaakt wordt door de snelheid, kleiner, waardoor de resultante kracht meer verticaal gericht wordt. Dit versterkt het effect van een minder stug reagerende mortel bij lage snelheid. Het resultaat is dat de balk de neiging krijgt om weg te zakken. Bij een hoge snelheid reageert de mortel stugger en is de horizontale component in het

krachtenstelsel groter, waardoor de resultante kracht niet alleen groter wordt, maar ook horizontaler gericht, waardoor de neiging van de balk om naar beneden te zakken minder is.

Tijdens de asfaltverwerkingsfase is de spreidbaarheid van het asfalt een belangrijk aspect. VBW-asfalt (2000) verstaat onder verwerkbaarheid van het asfalt de spreidbaarheid en verdichtbaarheid van het asfalt. De spreidbaarheid is een maat voor het gemak waarmee het asfalt door de spreidmachine of met de hand gelijkmatig over de werkbreedte kan worden verdeeld. De verdichtbaarheid is een maat voor het gemak waarmee het gespreide asfalt door het walsen tot een gewenste dichtheid kan worden gebracht (VBW-asfalt, 2000).

Sluer (2007) beschrijft een verwerkbaarheidstoets waarbij wordt beoogd dat bij het ontwerp of bij optimalisaties van asfaltmengsels op een gestructureerde manier wordt nagedacht over de verwerkbaarheid van de mengsels in de praktijk. Deze processtap wordt in de huidige praktijk vrijwel nooit gezet. Het voorstel voor de verwerkbaarheid betreft het uitvoeren van een proef waarbij de kracht gemeten wordt, die nodig is om specie af te schuiven. Bij de gekozen afschuifproef wordt een bepaalde hoeveelheid specie in een meetbak gebracht. Met behulp van een schuivende plaat wordt de specie afgeschoven. Dat levert een kracht-verplaatsingsdiagram op. De maximale kracht die voor het afschuiven nodig is als representatieve parameter genomen. Daarnaast doet Sluer (2007) een voorstel om de verdichtbaarheid te meten met de gyrator. De veronderstelling hierbij is dat als een specie 'goed' verdicht wordt in de gyrator, het ook goed zal verdichten onder de afwerkbalk en onder de wals.

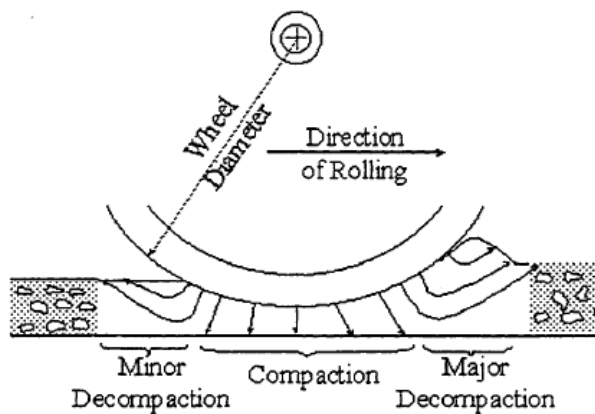
Bij de ontwikkeling van de verwerk- en verdichtbaarheidstoets is gebruik gemaakt van drie verschillende bindmiddelen, namelijk standaard bitumen 70/100, PMB exp8 en een als moeilijk verwerkbaar bekend staand polymeerbitumen (PMB-X) genoemd. Bij de afschuifproef blijkt dat de conventioneel 70/100 bitumen en PMB exp8 verwerkt worden met afschuifkrachten van rond de 70 Newton. Voor het verwerken van de PMB-X zijn hogere krachten nodig. Voor de verwerkbaarheid met de gyrator geldt dat het mengsel met PMB exp8 een goede verdichtbaarheid heeft. Het mengsel met PMB-X als bindmiddel blijkt veel moeilijker verdichtbaar (c.q. heeft meer gyraties nodig) (Sluer, 2007).

Sluer (2007) concludeert dat de verwerk- en verdichtbaarheid van (geheel) nieuwe mengsels gekarakteriseerd kan worden met de gyrator en de afschuifproef, zodat vooraf nagegaan kan worden of deze nieuwe mengsels in potentie al dan niet risicovol zijn met betrekking tot deze twee belangrijke eigenschappen.

Kritiek op de voorstellen van Sluer (2008) om de verdicht- en verwerkbaarheid van een mengsel te toetsen in het laboratorium is dat er geen rekening wordt gehouden met het elastische gedrag van asfalt. Daarnaast lijkt de gyrator maar matig geschikt om de verdichtbaarheid te simuleren, omdat het proefstuk vrij klein is, waardoor de opsluiting van het proefstuk minder realistisch is. Ook lijken de definities van VBW-asfalt over verwerk- en verdichtbaarheid consistent, omdat verdichten een aspect van het verwerken is. De afschuifproef lijkt daarom meer specifiek een spreidbaarheidsproef dan een verwerkbaarheidsproef.

1.2.3 Asfaltverdichting

Vervolgens kan de asfaltverdichting (met de wals) plaatsvinden. In de praktijk wordt het asfalt over het algemeen verdicht door middel van walsen. Kari (1967) beschrijft het als een dynamisch proces onder een bewegende rol (zie figuur 3.8). De walsrol zakt ver genoeg het asfalt in zodat het contactvlak van de wals groot genoeg is om draagkracht van het asfalt te vergroten. De voortbewegende kracht veroorzaakt schuifbewegingen met een zone van kleine decompactie achter de walsrol en een grote zone van decompactie voor de walsrol en verdichting direct onder de walsrol (Chadborn et al., 1998). Idealiter moet de viscositeit van het bindmiddel groot genoeg zijn om de decompactie van de wals te weerstaan, maar kleiner dan een understressed asfaltmengsel (Chadborn et al., 1998).



Figuur 3.8: Verdichting als dynamisch proces (Kari, 1967)

Van der Velden (2003) geeft 4 belangrijke aspecten waar de verdichting tijdens het verdichtingsproces vanaf hangt; de eigenschappen van de onderlaag, de samenstelling van het asfaltmengsel, het type wals en de temperatuur tijdens de verdichting.

De toestand van de ondergrond (klankbodem) is erg belangrijk voor de verdichting van het asfalt. Een goed verdichtte en vlakke ondergrond zal de verdichting van het asfalt ook doen verbeteren.

Ook de samenstelling van het asfaltmengsel heeft een grote invloed op de verdichting van het asfalt. Hierbij is de verwerkbaarheid van het mengsel een belangrijk aspect en de verwerkbaarheid van het asfalt is afhankelijk van het type mengsel. Bij alleen aggregaat zou een overheersende korrelgrootte een mindere dichtheid tot gevolg hebben, maar bij een asfaltmengsel wordt de holle ruimte eventueel opgevuld door de bitumen, waardoor niet alleen de korrelgrootte van belang is, maar ook de andere bouwstoffen van het asfaltmengsel (bitumen, vulstof), oftewel de totale samenstelling van het mengsel. Ook de haakweerstand, de vorm van de materiaaldeeltes (rond of hoekig) heeft een grote invloed op de verdichting van het asfalt. Hoekige en scherpkantige materiaaldeeltes geven een stabielere opbouw dan ronde materiaaldeeltes van dezelfde grootte. Als laatste heeft de hoeveelheid bitumen invloed op de verdichting van het asfalt; des te meer bitumen, des te beter de verdichting. De bitumen mogen niet te stijf zijn, omdat dan de overtollige lucht niet kan worden uitgedreven, zodat een verend effect kan ontstaan en ze mogen ook niet te slap zijn, omdat de vloeistof dan met de lucht uitgedreven kan worden, waardoor het oppervlak vet slaat.

Als derde is het type wals van belang voor de verdichting. Het gewicht, het al dan niet kunnen trillen van de wals en trilfrequentie zijn hierbij belangrijke parameters. Een gewicht van 40-60 kN wordt gebruikt voor het voorwalsen, een gewicht van 80-120 kN wordt gebruikt het verdichten. Daarnaast wordt het inschakelen van een trilmechanisme de verdichtingscapaciteit aanzienlijk verhoogt. Ook de trilfrequentie is van belang voor de verdichting; 50-500 slagen per minuut worden aangemerkt als lage frequenties en 900-2400 als hoge frequenties. De keuze van het walsmaterieel is afhankelijk van het type asfaltmengsel, de laagdikte, omgevingscondities, praktische redenen, etc., maar in het algemeen geldt dat hoe hoger het gewicht van de wals, des te groter het verdichtend effect is. De walstijd hangt af van de laagdikte, de weersomstandigheden en de ondergrond. Een dikke laag, warm weer en een ongelijkmatige ondergrond hebben een langere walstijd tot gevolg.

De overgebrachte druk op het asfaltoppervlak is afhankelijk van het gewicht, de diameter en het contactoppervlak van de walsrol. Om de effectiviteit van het walsen te kunnen vergelijken zijn verschillende walsrolkarakteristieken ontwikkeld. In dit afstudeerproject zijn er hiervan twee beschouwd, van Nijboer (1948) en van VBW-asfalt (2000). De walsrolkarakteristiek van Nijboer (1948) kan bepaald worden volgens formule 3.2a en de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt (2000) kan bepaald worden volgens formule 3.2b. De walsrolkarakteristiek van Nijboer is fundamenteel onderbouwd en die van VBW-asfalt is meer gebaseerd op ervaringen uit de praktijk. Over de bruikbaarheid van de walsrolkarakteristiek is een discussie gaande.

In dit afstudeeronderzoek wordt, om de impact van walsen te bepalen, gebruik gemaakt van de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt, omdat deze bij vakmensen in de praktijk het meest bekend is. Vol-

gens VBW-asfalt (2000) (formule 2.2) moet de walskarakteristiek (W) tussen 16 en 23 liggen; als de walsrolkarakteristiek kleiner is dan 16 krijgt de walsrol een strijkend effect en als deze hoger is dan 23 krijgt de walsrol een knijpend effect.

$$W = \frac{P}{l \cdot D} \quad \text{F3.2a}$$

Waarbij:

W = walsrolkarakteristiek

P = Belasting op de rol (kN)

l = Rolbreedte (m)

D = Roldiameter (m)

$$W = \frac{P}{l \cdot D^2} \quad \text{F3.2b}$$

Waarbij:

W = walsrolkarakteristiek

P = Belasting op de rol (kN)

l = Rolbreedte (m)

D = Roldiameter (m)

De walskarakteristiek (W) moet volgens VBW-asfalt (2000) tussen 16 en 23 liggen; als de walsrolkarakteristiek kleiner is dan 16 krijgt de walsrol een strijkend effect en als deze hoger is dan 23 krijgt de walsrol een knijpend effect.

De wijze van walsen gaat als volgt; De wals rijdt langs de zijkant van de asfaltlaag tot achter de spreidmachine en rijdt terug in het gewalste spoor tot het reeds afgekoelde oppervlak om daar vervolgens een halve rolbreedte te versporen en daarna weer richting de spreidmachine te rijden, maar nu iets verder dan de eerste walsgang (heen en weer) en vervolgens weer een halve rolbreedte te versporen etc. (Van der Velden, 2003). Van Stek en Linden (1992) geven aan dat de dichtheid van het asfalt toeneemt met de toename van het aantal walsovergangen. Het effect van elke walsovergang zal telkens anders zijn, omdat de asfalteigenschappen (o.a. de stijfheid van het mengsel door afkoeling) veranderen in de loop van het verdichtingsproces, waarmee rekening mee gehouden dient te worden. Als een wals gaat rijden ontstaat een ander beeld; het asfalt achter de wals is meer verdicht dan het asfalt voor de rol, waardoor de wals altijd tegen een heuveltje oprijdt. Hierdoor neemt de horizontale druk toe, waardoor het asfalt eerder horizontaal zal vervormen. De grootte van deze vervorming hangt af van de snelheid van de wals. Bij een lage snelheid kunnen de vervormingskrachten beter worden opgenomen, waardoor de ingebrachte energie gebruikt wordt voor het verdichten van het asfalt. In de fase waarin het asfalt zich elastisch gedraagt, kunnen de horizontale drukken leiden tot aanzienlijke verplaatsingen van het asfalt (schuiven en scheuren), omdat niet alle energie gebruikt kan worden om te verdichten.

Als vierde parameter is de temperatuur tijdens het verdichten van belang. De juiste temperatuur voor de verwerking is verschillend per type mengsel. Mengsels met een hoog bitumengehalte (bv. SMA) moeten bij een hoge temperatuur worden verwerkt, omdat de bitumen warm moeten blijven om te verwerken en mengsels met een laag bitumengehalte kunnen met een lagere temperatuur worden verwerkt. Bij een te lage temperatuur kunnen de bitumen niet goed meer 'smeren' met een niet-gesloten oppervlak als gevolg, dat snel kan worden beschadigd of vervormd door de verkeerslast. Bij een te hoge temperatuur ontstaat er opstuwing van het asfalmengsel naast de walsrol, ontstaan er dwarsscheurtjes in de asfaltlaag achter de wals, kleeft het mengsel aan de walsrol (ondanks voldoende bevochtiging) en zakt de wals te ver weg in het asfalt. Bij een juiste temperatuur treden er geen haarscheurtjes en opstuwing naast de walsrol op en heeft men geen last van kleven, zodat er een gesloten

oppervlak ontstaat. Als vuistregel wordt vaak gebruikt dat men tijdens het nawalsen de hand 5-6 seconden op het oppervlak van het asfalt moet kunnen houden.

Afwalsen (ongedaan maken van walsafdrukken en andere onregelmatigheden aan het oppervlak) is nog effectief tot een asfalttemperatuur van circa 60 graden Celsius (wanneer men nog net de platte hand op het asfalt kan houden) (VBW-asfalt, 2003). In de zomer koelt het asfalt niet snel af onder de 50 graden Celsius, zodat rekening gehouden moet worden met lange nawalstijden. Als het verkeer te vroeg op het asfalt wordt toegelaten, kan dit leiden tot spoorvorming door naverdichting van het verkeer (Van Stek en Linden, 1992).

Volgens VBW-asfalt (2000) zijn minstens vier factoren van invloed op de verdichtbaarheid van het mengsel; de mortelsamenstelling, de laagdikte, de viscositeit en het gebruik van brekerzand.

De mortelsamenstelling bepaalt de inwendige kleefkracht en daarmee de inwendige samenhang van het mengsel. Grotere korrels neigen tot afrollen en bemoeilijken daarmee een homogene spreiding. Daarnaast laten grotere korrels in een bepaalde laagdikte zich moeilijker verdichten dan kleinere stenen in dezelfde laagdikte. Maar door een geringe laagdikte koelt het asfalt relatief snel af, waardoor de verdichtbaarheid afneemt. Een relatief grote korrel is dus gunstig voor de stabiliteit van de laag, maar benadeelt de spreidbaarheid en verdichtbaarheid.

De viscositeit van het mengsel hangt sterk af van de viscositeit van het bindmiddel. Dit stelt eisen aan de temperaturen in de verschillende fasen van het verwerkingsproces. Dunne asfaltlagen koelen relatief snel af, waardoor de tijd voor optimale verdichting beperkt is. Toepassing van bitumen 70/100 geeft dan meer tijd om te verdichten dan toepassing van een bitumen 40/60.

De toepassing van brekerzand heeft een negatieve invloed op de verdichtbaarheid van het mengsel. Bij het gebruik van brekerzand zijn meer walsovergangen nodig onder gelijke omstandigheden om dezelfde verdichtbaarheid van het mengsel te behalen (VBW-asfalt, 2000).

1.2.4 Fasen asfaltmengsel verdichtingsproces

Van Stek en Linden (1992) constateren dat er bij het verdichten van dichte asfaltmengsels (DAB, GAB, STAB) in de praktijk 3 fasen in het verdichtingsproces kunnen worden onderscheiden:

- Fase 1: In deze fase moet de korrelrangschikking plaatsvinden. De stenen moeten langs elkaar kunnen glijden en dus moet de mortel nog voldoende flexibel, en dus warm, genoeg zijn. Als er stuwdruk ontstaat kan er lucht worden uitgedreven. De temperatuur van het asfalt achter de balk bepaalt de maximaal toelaatbare trekspanning. Als de wals verdicht vormt het oplegoppervlak zich voor de walsrollen, zonder grote horizontale verplaatsing. De mortel moet hierbij niet te stug worden. Voordat het asfalt tot 120 graden Celsius is afgekoeld, moet het korrelskelet zijn gerangschikt.
- Fase 2: In fase 2 gaat het asfalt zich anders gedragen. Door toenemende dichtheid en het toenemen van de mortelstijfheid bij een dalende temperatuur raakt de nog in het asfalt aanwezige lucht ingesloten, waardoor het asfalt zich zuiver elastisch gaat gedragen en dus is het verdichtingseffect verwaarloosbaar. Deze elastische fase is bij de gebruikelijke asfaltmengsel sterk temperatuurafhankelijk (90-120 graden Celsius). In deze fase mag de horizontale druk op het asfalt niet te hoog oplopen, omdat de kans op schuiven en scheuren groot is. Dit kan worden bereikt door onder een walskarakteristiek van 20 te blijven.
- Fase 3: In fase 3 (80 a 90 graden Celsius) kan de verdichting van het asfalt weer worden voortgezet door de verder toenemende stijfheid van de mortel en het afnemende volume van bitumen en lucht (krimp). Door deze krimp moet het korrelskelet nog verder samengedrukt worden. Door de relatief hoge mortelstijfheid en hoge mengseldichtheid is hiervoor een grote verticale druk nodig. Als er alleen nog verdicht dient te worden, en dus geen korrelrangschikking meer hoeft plaats te vinden, moet de walskarakteristiek tussen de 20 en 23 liggen en wanneer nog walssporen weggewalst moeten worden, en dus asfalt nog verplaats moet worden, dient de walskarakteristiek boven de 23 te liggen.

Samenvattend zijn voor het verdichten van asfaltlagen in het algemeen ten minste twee walsen nodig; 1 tussenwals die een niet te sterk knijpend effect geeft en 1 nawals die een hoge verticale druk veroorzaakt (en dus een hoger knijpend effect).

Volgens Ter Huerne (2004) is de verdichtingstoename te omschrijven als een soort middelingsproces en vindt het plaats in drie stappen. Tijdens de eerste verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats waar de spanningen op het materiaal het hoogst zijn (boven in de laag). Bij de tweede verdichtingsfase vindt de meeste verdichtingstoename plaats waar het materiaal het zachtst is (onder in de laag). Tijdens de derde verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats daar waar de druk relatief hoog in combinatie met waar het materiaal nog relatief zacht is (midden van de laag).

Bouwbedrijf Ooms heeft ook onderzoek gedaan naar de verschillende fasen binnen het verdichtingsproces, met name gericht op polymeer gemodificeerd asfalt. Hierin werd ook geconcludeerd dat het verdichtingsproces uit drie fasen bestaat; een fase tussen 170 en 120 graden Celsius met gebruik van een drierolwals, een fase tussen 120 en 90 graden Celsius met gebruik van een tandemwals en een fase tussen 90 en 60 graden Celsius met weer gebruik van een drierolwals. Deze fasen zijn weergegeven in bijlage 1.1.

In de praktijk zullen de fasen niet keurig verdeeld over het werk voorkomen door o.a. een ongelijkmatige temperatuur, ongelijkmatige laagdikte, etc. Voor een optimale verdichting is het dus zaak deze variaties zo klein mogelijk te houden (Van Stek en Linden, 1992).

VBW-asfalt (2003) geeft als toekomstige ontwikkeling aan dat de verdichting van het asfalt continue gemeten gaat met een automatische verdichtingsmeter. Op basis van deze metingen is zichtbaar of de gewenste verdichting al of niet bereikt is. Hierbij is het ook van belang dat er een temperatuurmeter aanwezig is en dat duidelijk bij welke temperaturen er nog verdicht kan worden. Anders is bijsturing alsnog niet mogelijk, omdat het asfalt te koud kan zijn om nog te verdichten en dan is het al te laat om nog te walsen.

Een andere toekomstige ontwikkeling is het in-situ kunnen meten van de mechanische eigenschappen. De la Roche (2009) doet akoestisch onderzoek om met behulp van geluidsgolven de mechanische kwaliteit van het asfalt te kunnen bepalen.

1.2.5 Verdichtingsmethoden

Om asfaltmengsels in het laboratorium te verdichten zijn er proeven nodig om het verdichten in de praktijk te simuleren. Deze proeven zullen minimaal aan de volgende criteria moeten voldoen:

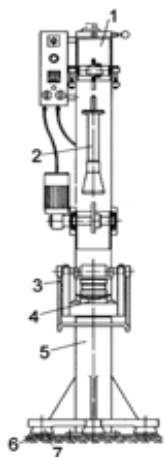
- Overeenkomst met de werkelijkheid;
- Het op een constante homogene temperatuur houden van het asfaltmengsel;
- Het opsluiten van het proefstuk.

De te kiezen proef zal de werkelijkheid van verdichten (in de praktijk walsen) zo goed mogelijk moeten simuleren. Aandachtspunten hierbij zijn de verticale en horizontale krachten die gesimuleerd moeten worden. Daarnaast dient het mogelijk te zijn om de proef met een zo homogene en constante temperatuur te kunnen doen, zodat uitspraken gedaan kunnen worden over de dichtheidsprogressie bij een bepaalde temperatuur en zodat de temperatuur dus constant gehouden kan worden. Ook dient het proefstuk opgesloten te worden zoveel mogelijk in overeenstemming met de werkelijkheid, omdat de insluiting van het proefstuk de dichtheidsprogressie in grote mate beïnvloedt. Het opsluitend effect bepaalt de relatie tussen verticale en horizontale druk. Als het opsluitend effect voldoende is, kan worden verdicht. Bij onvoldoende opsluiting van het asfalt, kan het asfalt door de wals worden verplaatst, met het uitwalsen van het asfalt als gevolg (Van Stek en Linden, 1992).

In de Europese standaarden (EN-12697) worden een viertal verdichtingsmethoden beschreven (delen 30 t/m 33). Dit zijn de volgende verdichtingsmethoden en zullen achtereenvolgens worden beschouwd (figuren uit Wistuba, 2009):

- Impact- en statische verdichting (figuur 3.9)
- Girerende verdichting (figuur 3.10)
- Vibrerende verdichting (figuur 3.11)
- Rollende verdichting (figuur 3.12)

De verschillende verdichtingsmethoden leiden tot verschillende resultaten met o.a. betrekking tot de structuur tussen bitumen en aggregaat, korreloriëntatie, volumetrische eigenschappen, holle ruimte etc. (Wistuba, 2009). Daarom zijn de resultaten van de verschillende verdichtingsmethoden niet tot nauwelijks te vergelijken.



Figuur 3.9

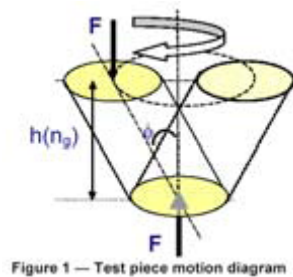
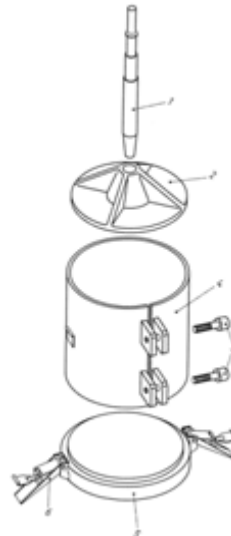
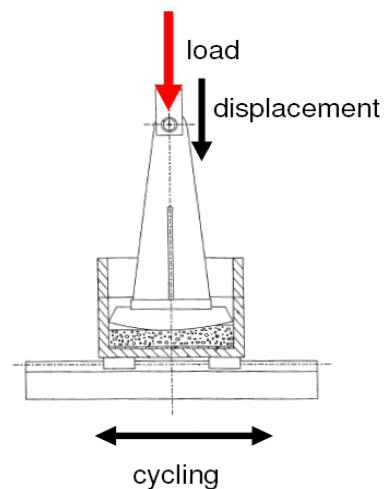


Figure 1 — Test piece motion diagram

Figuur 3.10



Figuur 3.11



Figuur 3.12

De impactverdichting gebeurt veelal met de Marshallhamer die een verticale kracht uitoefent op het proefstuk. Dit leidt over het algemeen tot stijvere mengsels dan de andere verdichtingsmethoden. De impactverdichting verschilt van de verdichting in de praktijk in het opzicht dat er geen horizontale/knedende krachten optreden, zodat korreloriëntatie kan plaatsvinden. Daarnaast is er een grote kans op verbrijzeling van het aggregaat (Mollenhauer en Wistuba, 2009).

De knedende verdichting vindt veelal plaats met behulp van de gyrator die meer knedende krachten uit kan oefenen. Deze knedende verdichting verschilt minder van de praktijk dan de impactverdichting. Over het algemeen verkrijgen de mengsels verdicht met de gyrator een hogere weerstand tegen permanente deformatie dan dat deze mengsels in de praktijk krijgen. Daarnaast ontstaat er vaak een heterogeen mengsel in relatie tot de holle ruimte, omdat de holle ruimte onder in het proefstuk opgesloten komt te zitten. Daarnaast is vaak te zien dat het grotere aggregaat vaak naar de zijkant van het proefstuk wordt gekneed (Mollenhauer, 2009). Khan (1998) heeft daarnaast een vergelijkend onderzoek gedaan naar een aantal verdichtingsmethoden (marshall + verschillende gyratorstanden) in het laboratorium. Hierin wordt geconcludeerd dat de gyrator met 1.25 graden de beste methode is, van de beschouwde methoden, om te verdichten (Khan et al., 1998).

De vibrerende verdichting vindt plaats door een vibrerende hamer die zich door het mengsel verplaatst. Over deze verdichtingsmethode is vooralsnog weinig informatie beschikbaar.

De rollende verdichting lijkt de beste methode om de verdichting uit de praktijk in het laboratorium te simuleren. Er vinden verticale en horizontale krachten plaats, er vindt een korreloriëntatie en een werkelijke verdichting plaats. Wel zijn de weerstand tegen deformatie en de stijfheid over het algemeen hoger dan de andere verdichtingsmethoden (Mollenhauer, 2009).

In tabel 3.3 zijn de beschouwde verdichtingsmethoden met de beoordelingen op de criteria weergegeven. De beoordelingen bestaan uit: Heel goed (++) , goed (+), matig (+-), slecht (-) en heel slecht (--). Uitgangspunt bij de keuze zal zijn dat op geen enkel criteria onvoldoende (slecht of heel slecht) gescoord mag worden.

Bij de impactverdichting is er geen sprake van een knedend effect, maar alleen van een verticale slagverdichting en er worden dus geen horizontale krachten uitgeoefend, waardoor de overeenkomst met de werkelijkheid erg laag is. Bij de knedende verdichting is de overeenkomst met de werkelijkheid aardig, omdat deze horizontale en verticale kracht simuleert, maar omdat er holle ruimte opgesloten kan blijven zitten is de overeenkomst met de werkelijkheid toch matig. Daarnaast is het een klein proefstuk en is er discussie over de simulering van het opsluiten van het proefstuk.

Over de vibrerende verdichting is vooral nog weinig bekend, maar de RAW Standaard geeft aan dat deze verdichtingsmethode niet meer toegepast mag worden, dus deze methode is niet meer verder onderzocht.

De rollende verdichting heeft de beste overeenkomst met de werkelijkheid volgens de literatuur (Mollenhauer, 2009). De rollende verdichting heeft daarbij veelal ook de mogelijkheid om het proefinstrument voor te verwarmen, zodat goed een homogene temperatuur kan worden verkregen. Ook is het proefstuk bij de rollende verdichting vrij groot, waardoor de opsluiting van het midden van het asfaltproefstuk een stuk realistischer is. Daarom is gekozen om een rollende verdichting in dit onderzoek toe te passen.

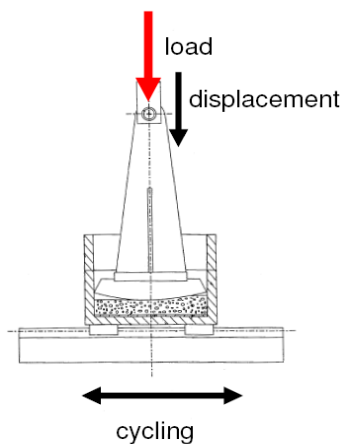
Tabel 3.3: Beoordeling verdichtingsmethoden

Verdichtingsmethode	Criteria		
	Overeenkomst werkelijkheid	Homogene temperatuur	Opsluiten proefstuk
Impactverdichting	--	+	-
Knedende verdichting	+ -	+	-
Vibrerende verdichting	?	?	?
Rollende verdichting	++	++	++

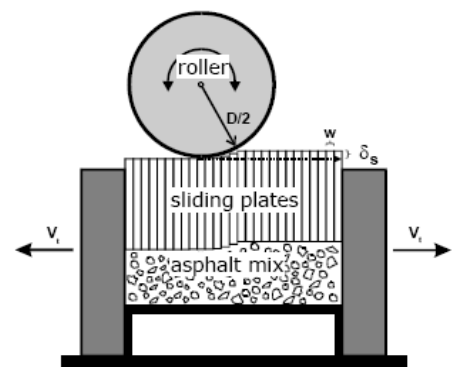
Binnen de rollende verdichting zijn er verschillende methoden mogelijk; verdichten met een pneumatisch wiel (figuur 3.13), verdichten met een walssegment (figuur 3.14) en verdichten met glijdende platen (figuur 3.15) (EN-12697-33).



Figuur 3.13: Pneumatisch wiel



Figuur 3.14: Walssegment



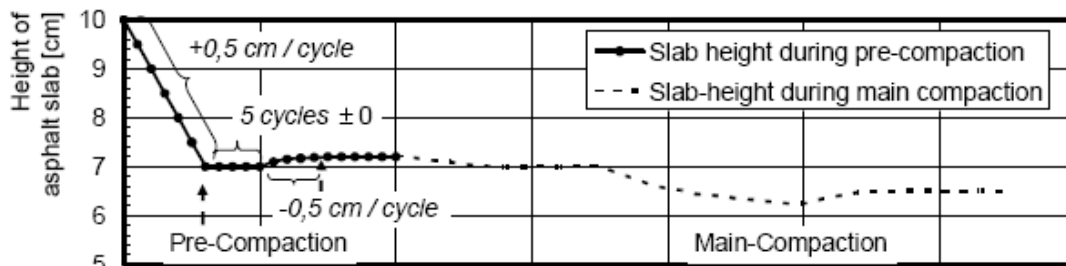
Figuur 3.15: Glijdende platen

Het argument waarop de keuze tussen deze verdichtingsmethoden binnen de rollende verdichting is gemaakt is een praktische, omdat alleen de walssegmentverdichter beschikbaar was. De walssegmentverdichter die in dit onderzoek is toegepast is de Freundl plaatverdichter (WSV-2008-KW50/500).

Mollenhauer (2009) heeft voor de verdichting met de walssegmentverdichter een tweetal standaard verdichtingsprocedures opgesteld voor de Duitse asfaltmengsels. Hierbij is ook het doel geweest om de verdichting in de praktijk zo goed mogelijk te simuleren, oftewel de voorverdichting van de spreidmachine en de hoofdverdichting met de walsen.

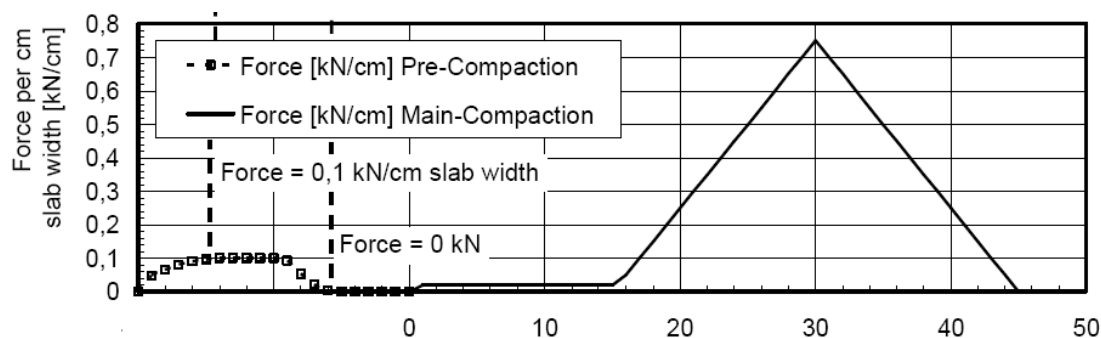
Mollenhauer (2009) geeft een tweetal verdichtingsprocedures; één gebaseerd op een kracht gestuurde verdichting (figuur 3.16) en één gebaseerd op een positie gestuurde verdichting (figuur 3.17). Deze procedures vormen het uitgangspunt voor de verdichting in dit onderzoek. Mollenhauer (2009) geeft aan dat de maximale kracht bij verdichting 1 kN per cm materiaal mag zijn en de snelheid van het walssegment moet 240 mm per seconde zijn. Tijdens de verdichting worden de kracht en de hoogte geregistreerd.

De procedure voor de positie gestuurde verdichting gaat als volgt: 1. Verdicht met 0,5 mm per wals-overgang tot 0,1 kN per centimeter materiaal, 2. Houd de hoogte constant voor 5 walsovergangen, 3. Ontlast de kracht met 0,5 mm. per walsovergang tot 0 kN.



Figuur 3.16: Positie gestuurde verdichting (Mollenhauer, 2009)

De procedure voor de kracht gestuurde verdichting gaat als volgt: 1. Verdicht 15 walsovergangen met 0,02 kN per cm. materiaal, 2. Verhoog in 15 walsovergangen constant de kracht tot 0,75 kN per cm. materiaal, 3. Ontlast de kracht in 15 walsovergangen tot 0 kN.



Figuur 3.17: Kracht gestuurde verdichting (Mollenhauer, 2009)

Mollenhauer (2009) beveelt de positie-gestuurde verdichting aan om de verdichting van de spreidmachine door middel van de balk te simuleren en beveelt de kracht-gestuurde verdichting aan om de verdichting door middel van de walsen te simuleren.

1.2.6 Conclusies

De conclusie is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.2 en deze onderzoeksvraag is in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.2:

Hoe vindt het verdichtingsproces in de huidige bouwpraktijk plaats?

Om het asfalt belastingen succesvol te laten dragen met weinig deformatie als gevolg is het nodig om het materiaal nader tot elkaar te brengen. Om dit te bereiken is het nodig om te korrels te rangschikken en lucht uit te drijven. Dit proces is bekend als verdichting (Ter Huerne, 2004).

Van der Velden (2003) definieert de dichtheid als de mate waarin de korrels in elkaar passen. Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen, de vochtigheidsgraad en de kracht die uitgeoefend wordt op de korrels (Van der Velden, 2003).

Er is een onderscheid in het asfaltverwerkingsproces gemaakt tussen verdichting tijdens de verwerking van het asfaltmengsel (in de vorm van voorverdichting door de balk) en de werkelijke verdichting met de wals. In dit onderzoek ligt de focus op de bulk van de verdichting met de wals en niet op de voorverdichting met de balk.

In de literatuur wordt daarnaast aangegeven dat tijdens de verdichting gelet moet worden op de eigenschappen van de onderlaag, de samenstelling van het asfaltmengsel, het type wals en de temperatuur tijdens de verdichting. In dit onderzoek is de verdichtingstemperatuur de onafhankelijke onderzoeksvariabele en de dichtheid en de mechanische eigenschappen zijn de afhankelijke onderzoeksvariabelen, oftewel in dit onderzoek wordt het effect van de verdichtingstemperatuur op de dichtheid en de mechanische eigenschappen onderzocht. De andere aandachtspunten dienen dus zo gelijk mogelijk te worden gehouden. In dit onderzoek wordt de onderlaag vlak gehouden door de onderkant van de bak van de Freundl vlak te houden, de samenstelling van het mengsel zal constant worden gehouden door het elke keer volgens de richtlijnen af te wegen.

Over het algemeen kunnen bij het verdichtingsproces drie fasen worden onderscheiden. Tijdens de eerste verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats waar de spanningen op het materiaal het hoogst zijn (boven in de laag). Bij de tweede verdichtingsfase vindt de meeste verdichtingstoename plaats waar het materiaal het zachtst is (onder in de laag). Tijdens de derde verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats daar waar de druk relatief hoog in combinatie met waar het materiaal nog relatief zacht is (midden van de laag). In dit onderzoek is ervoor gekozen om geen onderscheid te maken in deze fasen, maar om het verdichtingsproces in zijn geheel te beschouwen.

Voor een simulering van de verdichting in het laboratorium zijn in de Europese standaarden (EN-12697) een viertal verdichtingsmethoden beschreven; impact verdichting, knedende verdichting, vibrerende verdichting en rollende verdichting. De rollende verdichting heeft de beste overeenkomst met de werkelijkheid en heeft daarbij veelal ook de mogelijkheid om het proefinstrument voor te verwarmen, zodat goed een homogene temperatuur kan worden verkregen. Ook is het proefstuk bij de rollende verdichting vrij groot, waardoor de opsluiting van het midden van het asfaltproefstuk in hoge mate met de werkelijkheid overeenkomt. Daarom is gekozen om een rollende verdichting in dit onderzoek toe te passen. Binnen de rollende verdichting zijn er verschillende methoden mogelijk; verdichten met een pneumatisch wiel, verdichten met een walssegment en verdichten met glijdende platen (EN-12697-33). Het argument waarop de keuze tussen deze verdichtingsmethoden binnen de rollende verdichting is gemaakt is een praktische, omdat alleen de walssegmentverdichter beschikbaar is binnen Ooms. De walssegmentverdichter die in dit onderzoek is toegepast is de Freundl plaatverdichter (WSV-2008-KW50/500).

Mollenhauer (2009) heeft voor de verdichting met de walssegmentverdichter een tweetal standaard verdichtingsprocedures opgesteld voor de Duitse asfaltmengsels; één gebaseerd op een kracht gestuurde verdichting en één gebaseerd op een positie gestuurde verdichting. Mollenhauer (2009) beveelt de positie-gestuurde verdichting aan om de verdichting van de spreidmachine door middel van de balk te simuleren en beveelt de kracht-gestuurde verdichting aan om de verdichting door middel van de walsen te simuleren. Deze procedures vormen het uitgangspunt voor de verdichting in dit onderzoek.

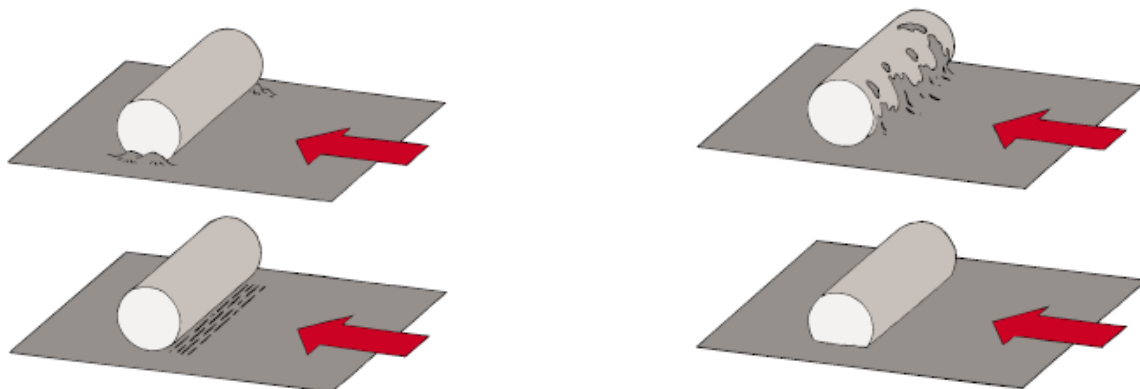
1.3 De temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting

1.3.1 Afkoeling van asfalt

Volgens vele asfalttechnologen is de temperatuur van het materiaal (het asfaltmengsel) de belangrijkste parameter voor het verdichten van het asfaltmengsel ((Chadbourn et al., 1998; Timm et al., 2001).

Bossemeyer (1986) heeft onderzoek gedaan naar de modellering van de afkoeling van het asfaltmengsel. Hierbij is aangegeven dat de afkoeling van het asfaltmengsel afhangt van de temperatuur tijdens aanbrennen, de laagdikte, de windsnelheid, neerslag, de buitentemperatuur en de temperatuur van de ondergrond.

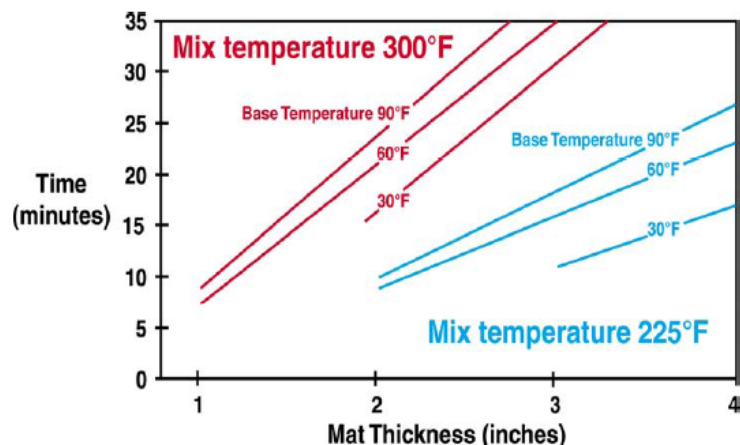
Volgens Van der Velden (2003) is het gunstige temperatuurgebied afhankelijk van de mengselsamenstelling, de dikte van de laag, het soort bindmiddel, type en werkwijze van de spreidmachine, het walsgewicht, de buitentemperatuur en de windkracht. Volgens Van der Velden (2003) mag de temperatuur nooit onder de 70 graden Celsius komen voordat de wals op het asfalt gaat. De juiste temperatuur voor de verwerking is afhankelijk van het type mengsel. Mengsels met een hoog bitumengehalte (bv. SMA) moeten bij een hoge temperatuur worden verwerkt, omdat de bitumen warm moeten blijven om te verwerken en mengsels met een laag bitumengehalte kunnen met een lagere temperatuur worden verwerkt. Bij een te lage temperatuur kunnen de bitumen niet goed meer 'smeren' met een niet-gesloten oppervlak als gevolg, dat snel kan worden beschadigd of vervormd door de verkeerslast. Bij een te hoge temperatuur ontstaat er opstuwing van het asfaltmengsel naast de walsrol, ontstaan er dwarscheurtjes in de asfaltlaag achter de wals, kleeft het mengsel aan de walsrol (ondanks voldoende bevochtiging) en zakt de wals te ver weg in het asfalt (zie figuur 3.18). Bij een juiste temperatuur treden er geen haarscheurtjes en opstuwing naast de walsrol op en heeft men geen last van kleven, zodat er een gesloten oppervlak ontstaat.



Figuur 3.18: Gevolgen van te hoge temperatuur tijdens verdichting (VBW-asfalt, 2003)

Volgens eerdere methoden werd de verdichtingstemperatuur bepaald door het plotten van de log-log viscositeit vs. de log temperatuur, waarbij vervolgens de temperatuur bepaald werd bij een viscositeit van 1.7 poise. Corlew en Dickson (1970) geven een minimale temperatuur om te verdichten van 80 graden Celsius en geven door middel van grafieken de tijdlimieten om te verdichten aan. Deze richtlijnen geven inzicht in wanneer er begonnen en geëindigd dient te worden met verdichten, maar geven geen inzicht in de temperatuurrange waarbinnen verdichten dient te worden. Minimale en maximale temperaturen waarbinnen verdicht dient te worden zouden bepaald moeten worden per mengseltype.

In figuur 3.19 is een voorbeeld van de tijdlimieten volgens Corlew en Dickson (1970) weergegeven. In dit voorbeeld geldt bij een mixtemperatuur van 300 Fahrenheit, een ondergrond temperatuur van 90 Fahrenheit en een laagdikte van 2 inch dat er ongeveer 23 minuten tijd is om het verdichtingsproces te voltooien, voordat het mengsel te koud is.



Figuur 3.19: Voorbeeld tijdlimieten verdichting volgens Corlew en Dickson (1970)

Later hebben Jordan en Thomas (1976), Daines (1985) en Luoma et al (1995) bruikbare tools ontwikkeld om het temperatuurenster te bepalen. Deze aanpakken zijn dus gerelateerd aan de dichtheid bereikt bij een bepaalde temperatuur, waarbij de verdichtingsgraad als parameter voor de kwaliteit wordt gezien. In dit afstudeerproject is onderzocht of de verdichtingstemperatuur hierbij ook een belangrijke parameter voor de kwaliteit is. Decker (2006) constateert al dat het vaststellen van de mixtemperatuur en de verdichtingstemperatuur met behulp van de temperatuur-viscositeit figuren (bv. Nomogrammen van Heukelom) lang niet altijd meer voldoen. Meer viskeuze bindmiddelen kunnen de temperaturen waarbij verwerkt dient te worden verhogen terwijl er niet altijd genoeg tijd beschikbaar is voor de verdichting.

Omdat deze aanpakken heden ten dage niet meer voldoen zijn verschillende afkoelingsmodellen ontwikkeld om de afkoeling van het asfaltmengsel als functie van de tijd te kunnen voorspellen. Achtereenvolgens zullen een aantal aanpakken voor het voorspellen van de temperatuur worden beschouwd en uiteindelijk zullen conclusies worden getrokken betreffende dit onderzoek.

1.3.1.1 An asphalt paving tool for adverse conditions (Chadborn et al., 1998)

Volgens Chadborn et al (1998) is de temperatuur de belangrijkste factor in het bereiken van de juiste dichtheid. De temperatuur van het asfaltmengsel is afhankelijk van de asfaltcentrale, het verwerkingsproces, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte en dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid en zonnewarmte). Als het mengsel te warm is zal het mengsel overstressed raken, is het mengsel te koud dan zal het mengsel understressed raken. Dit geeft aan hoe belangrijk het is om een juiste temperatuur tijdens verdichten te hebben om de juiste dichtheid en mengseleigenschappen te behalen.

Chadborn et al (1998) hebben een afkoelingsmodel ontwikkeld genaamd Pavcool. Dit programma is gebaseerd op numerieke waarden om de afkoeling te voorspellen gebruik makende van een eindige elementenmethode. In het programma Pavcool moeten de volgende parameters worden ingevuld om de afkoeling en het tijdsvenster om de verdichten te bepalen; de temperatuur tijdens verdichting, de tijd van het jaar, de tijd op de dag, de breedtegraad, het weertype, de buitentemperatuur, de laagdikte, de ondergrond (materiaal en temperatuur) en de mengseleigenschappen.

Dit afkoelingsmodel verschilt van andere modellen op de volgende punten:

- Andere modellen veronderstellen een vaste laagdikte, terwijl deze in werkelijkheid na elke walsovergang verandert. Dit model houdt rekening met het effect van verdichting en de warmtestroom tijdens de deformatie;

- Andere modellen veronderstellen vaste waarden voor de warmte-eigenschappen. In de werkelijkheid veranderen de warmte-eigenschappen met de temperatuur, de laagdikte en het asfaltmengsel. Dit model houdt rekening met de veranderende warmte-eigenschappen, met name dat de eigenschappen veranderen met de verandering in laagdikte.

1.3.1.2 Modelling of the compaction of asphalt layers (Van Dee, 1999)

Van Dee (1999) heeft drie methoden onderzocht om de afkoeling van de temperatuur van de asfaltlaag te voorspellen; Bossemeyer, WEGTEM, Heat2. De basis van deze rekenmethoden is de differentiaalvergelijking F3.3.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = a \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x^2} = a \quad \text{F3.3}$$

Waarbij:

θ = temperatuur

t = tijd

a = thermal conductivity

x = afstand tot vrije oppervlakte

Het verschil tussen de methoden is hoe deze vergelijking wordt opgelost. Van Dee (1999) concludeert dat het model van Bossemeyer een geschikt model is voor het voorspellen van afkoelingstijden van asfaltlagen, maar het neemt de verkregen warmte door radiatie van de asfaltlaag niet mee, terwijl dat niet verwaarloosbaar is. Bossemeyer heeft een formule ontwikkeld (F3.4.) om de gemiddelde temperatuur van een asfaltlaag als een functie van de tijd te bepalen.

$$z_m = \frac{100}{1 + 0,73\tau^{0,79^e}} \cdot 0,38 \cdot \frac{1}{\epsilon_r} \tau \quad \text{F3.4}$$

$$\tau = \frac{2a}{d^2} t$$

Waarbij:

Z_m = geschatte temperatuur

E_r = pole waarde

τ = tijdsfactor

a = thermal conducting ability

d = laagdikte (m)

t = tijd (uur)

Hierbij wordt ook geconcludeerd op basis van het model van Bossemeyer dat er 30% meer tijd is voor het verdichtingsproces als de buitentemperatuur 20 graden Celsius is i.p.v. 0 graden Celsius (Van Dee, 1999).

Daarnaast concludeert Van Dee (1999) dat het meten van de temperatuur in de asfaltlaag goed kan met de thermokoppels. De oppervlaktetemperatuur van de asfaltlaag kan volgens Van Dee (1999) beter worden gemeten met een infrarood camera.

1.3.1.3 Compaction of asphalt road pavement (Ter Huerne, 2004)

De afkoeling van een materiaal is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen het materiaal en de omgeving, de eigenschappen van de oppervlakte van het materiaal en de afstand tussen de objecten die energie (warmte) uitwisselen (Ter Huerne, 2004). Dit is mathematisch weergegeven met formule 3.5.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{F3.5}$$

Waarbij:

q''_x = warmtestroom

k = thermal conductivity coefficient van het materiaal

dT = temperatuurverschil

dx = afstand tussen de objecten

De formule laat zien dat de warmtestroom afhankelijk is van het verschil in temperatuur, oftewel tussen het asfalt en de omgeving. Omdat de nieuwe temperatuur de nieuwe warmtestroom bepaald is de curve logaritmisch; de logaritme van de temperatuur versus de tijd (Ter Huerne, 2004).

Ter Huerne (2004) concludeert dat de temperatuur van het materiaal voorspeld kan worden met formule 3.6.

$$T_{hma} = T_{ini} \cdot 10^{S \cdot t \cdot I} + T_{air} \quad \text{F3.6}$$

Waarbij:

T_{hma} = huidige temperatuur van het asfalt

T_{ini} = verschil tussen materiaal temperatuur en luchttemperatuur

S = geschatte helling van het model

I = geschatte kruising van het model

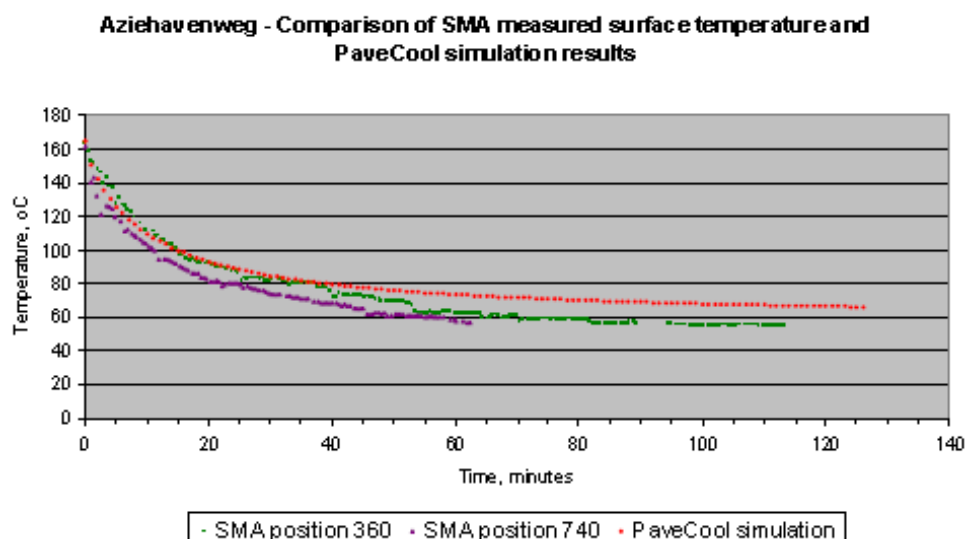
t = tijd na spreiden (minuten)

T_{air} = huidige luchttemperatuur

Uit metingen van Ter Huerne (2004) op basis van de onderzochte cases blijkt dat een hogere temperatuur van het materiaal niet leidt tot een beter te verdichten mengsel (bij verschillen tot 33 °C) in tegenstelling tot andere literatuur (Timm et al., 2001; Van der Velden, 2003).

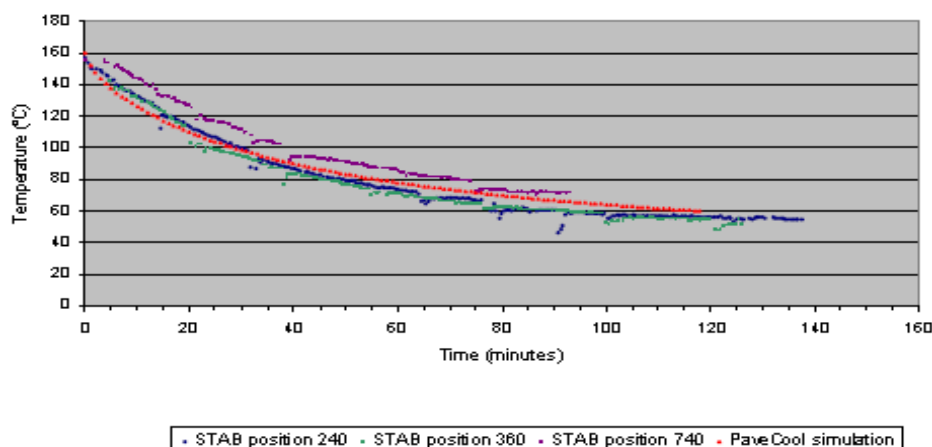
1.3.1.4 Modeling of the compaction of asphalt layers (Miller en Dorée, 2008)

Miller (2008) heeft onderzoek gedaan naar de afkoeling van Nederlandse mengsels en deze vergeleken met de afkoelingscurven in het programma Pavecool (Chadbourn et al., 1998). Hierin wordt geconcludeerd dat de afkoeling van een STAB-laag en een SMA-laag een hoge mate van correlatie vertoont met het programma Pavecool (Miller en Dorée, 2008), hetgeen is weergegeven in de figuren 3.20 en 3.21.



Figuur 3.20: Vergelijking SMA-mengsel en Pavecool (Miller en Dorée, 2008)

Aziehavenweg - comparison of STAB measured surface temperature and PavCool simulation results



Figuur 3.21: Vergelijking STAB-mengsel en Pavcool (Miller en Dorée, 2008)

1.3.2 Homogeniteit temperatuur asfaltlaag

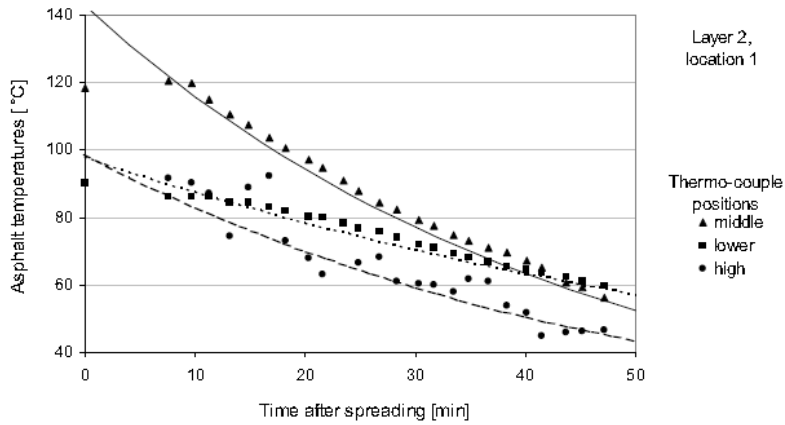
Omdat de temperatuur van het materiaal en de dichtheid veranderen tijdens het verdichtingsproces zullen ook de mechanische eigenschappen van het materiaal veranderen. Om het verdichtingsproces te simuleren zal het materiaalgedrag van het asfaltmengsel zo goed mogelijk gesimuleerd moeten worden op elke dikte van de asfaltlaag en tijdens elk moment tijdens het verdichtingsproces. Daarom is dichtheid, de temperatuur en de kracht die uitgeoefend wordt op meerdere plekken in de asfaltlaag nodig (Ter Huerne, 2004).

In de literatuur is onderzoek gedaan naar de temperatuurverdeling binnen een asfaltlaag. De bestudeerde literatuur is achtereenvolgens beschouwd.

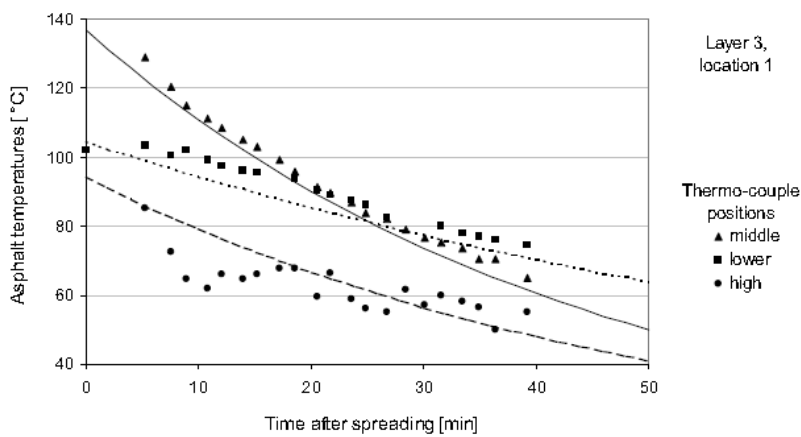
1.3.2.1 Compaction of asphalt road pavements (Ter Huerne, 2004)

Ter Huerne (2004) heeft de dichtheidsprogressie gemeten gerelateerd aan het aantal walsovergangen en de materiaaltertemperatuur. Op basis van het aantal walsovergangen na verwerking en de afkoelingscurve heeft Ter Huerne (2004) de afkoelingscurve ten opzichte van het aantal walsovergangen gemeten. Hierbij was de verdeling van de temperatuur over de laag van belang voor het simuleren van temperatuurafhankelijkheid van het materiaal.

Ter Huerne (2004) heeft op die drie plaatsen in de laagdikte de temperatuur gemeten tijdens het verdichtingsproces; de onderkant van de laag, het midden van de laag en de oppervlakte van de laag. Twee voorbeelden zijn hiervan in de figuren 3.22 en 3.23 weergegeven. Hierin is te zien dat het midden van de laag het warmst is, de oppervlaktetemperatuur het koudst is en dat de temperatuur van het midden van de laag hiertussen ligt. Daarnaast is te zien dat het midden van de laag sneller afkoelt dan de onderkant van de laag.

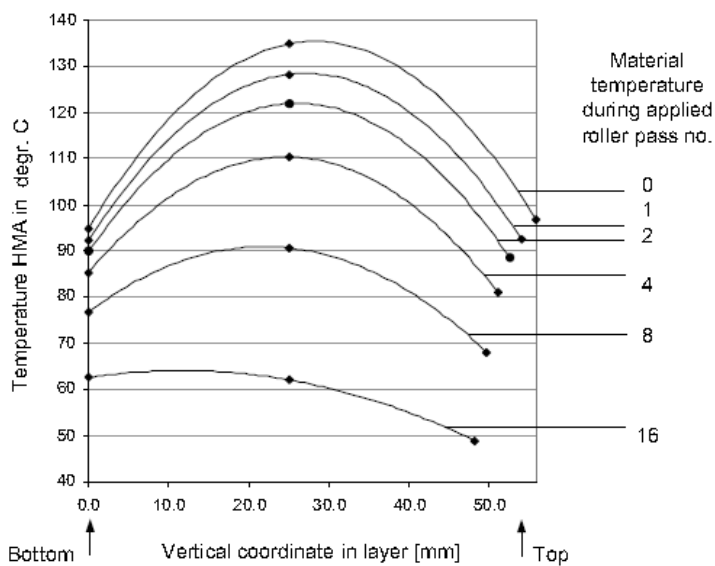


Figuur 3.22: Temperatuurverdeling in de tweede asfaltlaag (Ter Huerne, 2004)



Figuur 3.23: Temperatuurverdeling in de derde asfaltlaag (Ter Huerne, 2004)

In figuur 3.24 is de temperatuurverdeling in de asfaltlaag per walsovergang weergegeven. Hierin is te zien dat het midden van de laag het warmst is en dat de onderkant en de bovenkant van de asfaltlaag kouder zijn. Daarnaast is te zien dat de temperatuur na elke walsovergang is afgenomen.



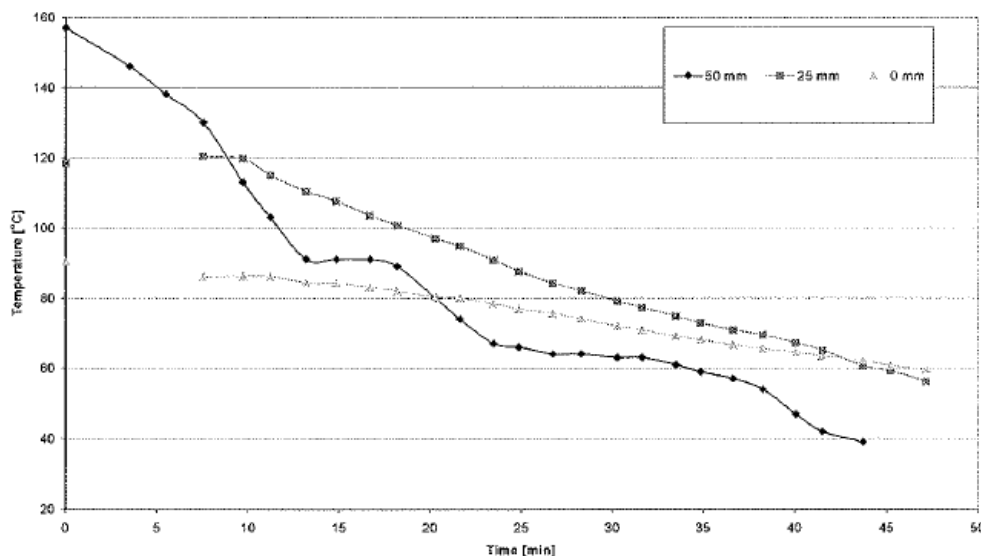
Figuur 3.24: Temperatuurverdeling per walsovergang (Ter Huerne, 2004)

Ter Huerne (2004) concludeert in zijn onderzoek dat de rol van temperatuur (verschillen tot 33 graden Celsius) op de dichtheid tijdens het verdichtingsproces, onder de onderzochte omstandigheden bij het onderzochte mengsel, niet significant is.

1.3.2.2 Modelling of the compaction of asphalt layers (Van Dee, 1999)

Van Dee (1999) heeft onderzoek gedaan naar de van invloed zijnde parameters op de verdichting van asfalt. Hierin wordt geconcludeerd dat de mengselsamenstelling, de laagdikte, het walstype, het aantal walsovergangen en de temperatuur van de asfaltlaag van belang zijn.

Van Dee (1999) heeft de verschillende temperaturen in verschillende asfaltlagen in beeld gebracht. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 3.25.



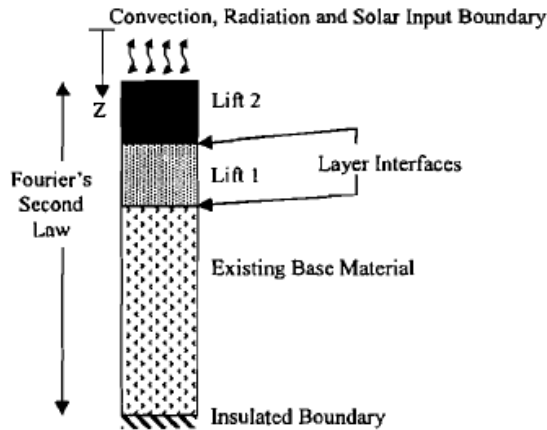
Figuur 3.25: Voorbeeld temperatuurverdeling (Van Dee, 1999)

Van Dee (1999) concludeert dat het moeilijk is om de afkoeling van een asfaltlaag te voorspellen. De temperatuurcurve is een functie van tijd en diepte in de laag, hetgeen inhoudt dat de materiaaleigenschappen een functie van plaats en tijd zijn.

Daarnaast concludeert Van Dee (1999) dat het effect van wind en water moeilijk te voorspellen is. Met het programma Heat2 is de asfaltlaag beschouwd als functie van tijd, diepte in de laag en weersomstandigheden. Hierbij wordt geconcludeerd dat de gemeten temperaturen in het begin te laag zijn en aan het eind te hoog ten opzichte van de voorspelde afkoelingscurve.

1.3.2.3 Calcool: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction (Timm et al, 2001)

Timm et al (2001) geven aan dat de temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag afhankelijk is van de ondergrond. Wanneer er meerdere asfaltlagen bovenop elkaar worden aangebracht is de onderliggende laag een warmtebron van de aan te brengen asfaltlaag en dit heeft invloed op de afkoeling van de nieuwe asfaltlaag. Dit is weergegeven in figuur 3.26.



Figuur 3.26: Warmte van de onderlaag (Timm et al, 2001)

Timm et al (2001) concluderen dat er rekening gehouden dient te worden met de ondergrond van de asfaltlaag. Hierdoor ziet niet elke temperatuurverdeling eruit zoals weergegeven in figuur 3.24 (Ter Huerne), maar kan de onderkant van een asfaltlaag veel warmer zijn dan in de figuur is aangegeven, waardoor het gehele mengsel ook minder snel afkoelt.

1.3.3 Proefproject

Dorée en Miller (2009) hebben onderzoek gedaan naar de temperatuurhomogeniteit en het verdichtingsproces van asfalt. Bij de onderzochte case hadden het STAB- en SMA-mengsel een goede temperatuurhomogeniteit. Het effect van stopplaatsen op de dichtheid zijn duidelijk vastgelegd. Ze concluderen dat Temperatuur Contour Plots (TCP) een goed instrument zijn om de temperatuurhomogeniteit te bepalen.

Op basis van de onderzochte case concluderen ze het volgende (Miller en Dorée, 2009):

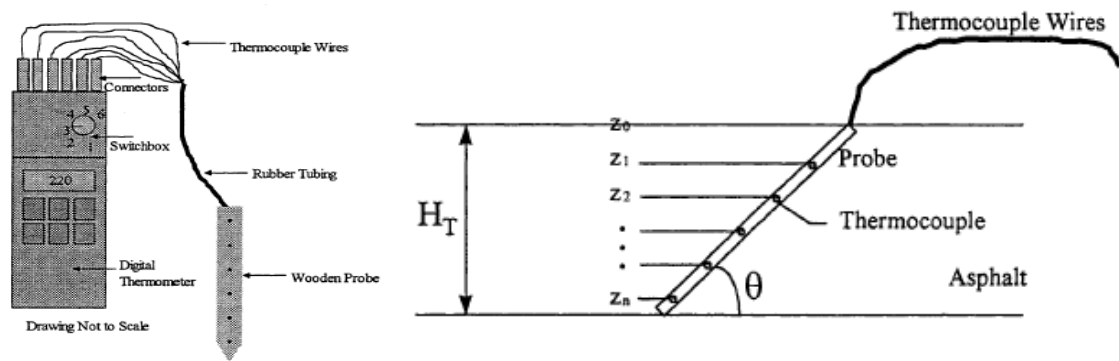
- Afkoelingscurves zijn redelijk consistent en ook voorspelbaar. Pavecool lijkt ook voor Nederlandse mengsels bruikbaar;
- Voor de onderzochte praktijkstudie is een functie gevonden om door middel van de oppervlaktetemperatuur de temperatuur in het hart van de asfaltlaag te voorspellen;
- De wisselende omstandigheden tijdens de verdichting in de praktijk (o.a. een dalende temperatuur van het asfalt) maskeren een relatie tussen de dichtheid en het aantal walsovergangen. Niettemin zegt men wel een relatie gevonden te hebben tussen het aantal walsovergangen en de nucleair gemeten dichtheid en de dichtheid van de boorkernen. Dit lijkt een voorbarige conclusie, omdat het effect van de dalende temperatuur op deze variabelen onduidelijk blijft.

1.3.4 Meten van de temperatuur

De temperatuur zal op verschillende plaatsen in het asfaltmengsel gemeten moeten worden. Theoretisch gezien zou de temperatuur op iedere dikte van de asfaltlaag gemeten kunnen worden (bv. per millimeter), maar in dit onderzoek is ervoor gekozen om dit te versimpelen en zal de temperatuur ongeveer per 10 á 20 millimeter gemeten worden, zodat de oppervlaktetemperatuur gemeten zal worden, de temperatuur van het midden van de asfaltlaag en de temperatuur in de onderkant van de asfaltlaag gemeten zal worden.

De temperatuur kan op verschillende manieren worden gemeten:

- (digitale) Thermometer;
- Thermokoppel draden (een voorbeeld is weergegeven in figuur 3.27)



Figuur 3.27: Thermokoppel wires (Chadbourn et al., 1998)

Het thermokoppel-instrument meet op verschillende plekken de temperatuur in het asfalt door middel van een houten schacht waar meerdere meetpunten op zitten die aangesloten zijn op een digitale thermometer (links figuur 3.27). De houten schacht wordt schuin in de asfaltlaag gestoken (rechts figuur 3.27).

Voor het meten van de temperatuur van het asfaltmengsel binnen de Freundl zal gebruik worden gemaakt van de thermokoppel draden, alleen dan zonder houten schacht, zodat alleen de thermokoppel draden in het asfalt gestoken hoeven worden.

1.3.5 Conclusies

De conclusie is geschreven aan de hand van de onderzoeksvragen 1.3 en 1.4 en deze onderzoeksvragen zijn in deze paragraaf beantwoord.

Onderzoeksvraag 1.3:

Hoe kan de afkoeling van een asfaltmengsel worden voorspeld en welke parameters zijn hierop van invloed?

Er zijn een aantal afkoelingsmodellen in de literatuur beschikbaar. Hieruit zal een keuze gemaakt moeten worden welk afkoelingsmodel gebruikt gaat worden om het tijdsvenster te kunnen bepalen op basis van het ideale temperatuurvenster. Er is gekozen om het model van Chadbourn et al (1998) (Pavecool) toe te passen, omdat het een geautomatiseerd model is, zodat het snel toepasbaar is en omdat het model gevalideerd is voor een aantal Nederlandse mengsels door Miller (2008) en goed bruikbaar geacht voor Nederlandse asfaltmengsels.

Belangrijke parameters waarmee rekening gehouden dient te worden bij de afkoeling van het asfaltmengsel tijdens verdichting zijn de temperatuur bij de asfaltcentrale, de temperatuur tijdens aanbrennen, de temperatuur van de ondergrond, het verwerkingsproces, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte, de dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid, neerslag en zonnewarmte). Er is gekozen om de afkoeling van het asfaltmengsel met het model van Chadbourn et al (1998) (Pavecool) te voorspellen;

Daarnaast is de literatuur onduidelijk of het in principe beter voor de verdichting is om een hoge temperatuur of een lage temperatuur te hebben. Volgens VBW-asfalt (2003) geldt in principe dat hoe hoger de temperatuur, hoe beter het mengsel te verdichten is. Volgens Van der Velden (2003) geldt dat hoe lager de temperatuur, des te beter de verdichting.

Daarnaast is het opvallend dat uit metingen van Ter Huerne (2004) blijkt dat een hogere temperatuur van het materiaal niet leidt tot een beter te verdichten mengsel (bij verschillen tot 33 °C) in tegenstelling tot andere literatuur (Timm et al., 2001; Van der Velden, 2003).

In dit onderzoek zijn daarom uitspraken gewenst over welke temperatuur (hoog of laag) in principe een betere verdichting tot gevolg heeft en uitspraken of een verschil in temperatuur invloed heeft op de verdichtbaarheid van asfaltmengsels.

Wel wordt in diverse literatuur (VBW-asfalt, 2003; Ooms (bijlage 1.1)) geconcludeerd dat het tot 60 °C nog effectief is om te verdichten. Bij een lagere temperatuur kan er geen verdichtingsprogressie meer bereikt worden en kunnen walsafdrukken en andere onregelmatigheden niet tot moeilijk weggewerkt worden.

Onderzoeksvraag 1.4:

Waar is de temperatuurverdeling over de verticale richting van het asfaltmengsel van afhankelijk en wat is het effect van deze temperatuurverdeling?

Belangrijke parameters die de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag beïnvloeden zijn de buitentemperatuur, de windsnelheid, neerslag en de temperatuur van de ondergrond. In de literatuur zijn wel regelmatig metingen naar de verticale temperatuurverdeling binnen een asfaltlaag gedaan, maar hieruit zijn tot nu toe weinig conclusies getrokken. Omdat uit deze metingen geen conclusies zijn getrokken dienen deze resultaten met een bepaalde onzekerheid te worden geïnterpreteerd. Daarentegen geven de onderzoeken wel vaak aan dat het belangrijk is om rekening te houden met het feit dat de temperatuur binnen een asfaltlaag niet gelijk (homogeen) is. Dit geeft wel het nut aan om onderscheid te maken in verschillende temperaturen binnen de asfaltlaag, maar het effect van deze temperatuurverdeling is vooralsnog onduidelijk.

Binnen dit onderzoek is niet verder ingegaan op het effect van een heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag. Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen naar het effect van deze heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag.

Om de afkoeling van het asfaltmengsel in de loop van de tijd en de verticale temperatuurverdeling binnen het asfaltmengsel te meten is in dit onderzoek gebruik gemaakt van thermokoppel draden.

1.4 Conclusie theorie

Op basis van dit literatuuronderzoek moet duidelijk worden op welke parameters gelet moet worden tijdens het empirisch onderzoek. De conclusie van dit gehele hoofdstuk is geschreven aan de hand van onderzoeksvraag 1.

Onderzoeksvraag 1:

Welke parameters zijn van invloed op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces?

Om antwoord op deze vraag te kunnen geven zijn een drietal aspecten uitgediept; het asfaltmengsel, het verdichtingsproces en het afkoelingsproces. Deze aspecten zijn uitgediept in de onderzoeksvragen 1.1 tot en met 1.4, hetgeen heeft geresulteerd in een lijst met parameters die van invloed zijn op het afkoelingsproces van het asfaltmengsel tijdens het verdichtingsproces:

- Het asfaltmengsel heeft kenmerken van elastisch, plastisch en viskeus gedrag. Tijdens het verdichtingsproces met de walsen overheersen het viskeuze en elastische gedrag. In het empirisch onderzoek dient er dus rekening mee gehouden te worden dat het asfaltmengsel visco-elastisch gedrag vertoont en dat er een elastisch effect plaats kan vinden na het verdichten, zonder dat deze direct geregistreerd wordt;
- Factoren die van invloed zijn op de dichtheid zijn de gradatie en samenstelling van de bouwstoffen (o.a. regeneratieasfalt, bitumen en vulstof), de vochtigheidsgraad, de verdichtingstemperatuur en de spanningen die uitgeoefend worden op de korrels (verticale belasting, opsluitspanning en hieruit voortvloeiende schuifspanningen);
- Het verdichtingsproces bestaat uit een drietal fasen. In de eerste fase vindt een korrelrangschikking plaats, in de tweede fase vindt de werkelijke verdichting plaats, waarbij door het

toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt, en in de derde fase dienen oneffenheden weggewalst te worden;

- Het materiaal ondergaat tijdens het verdichtingsproces een drietal fasen. Tijdens de eerste verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats waar de spanningen op het materiaal het hoogst zijn (boven in de laag). Bij de tweede verdichtingsfase vindt de meeste verdichtingstoename plaats waar het materiaal het zachtst is (onder in de laag). Tijdens de derde verdichtingsfase vindt de meeste progressie plaats daar waar de druk relatief hoog in combinatie met waar het materiaal nog relatief zacht is (midden van de laag);
- Belangrijke parameters waarmee rekening gehouden dient te worden bij de afkoeling van het asfaltmengsel tijdens verdichting zijn de temperatuur bij de asfaltcentrale, de temperatuur tijdens aanbrengen, de temperatuur van de ondergrond, het verwerkingsproces en walsregimes, de warmte-eigenschappen van het asfaltmengsel, de laagdikte, de dichtheid en de omgevingscondities (lucht- en ondergrondtemperatuur, windsnelheid, neerslag en zonnewarmte, warmtestraling). Er is gekozen om de afkoeling van het asfaltmengsel met het model van Chadbourn et al (1998) (Pavecool) te voorspellen;
- Belangrijke parameters die de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag beïnvloeden tijdens verdichting zijn de laagdikte, de buitentemperatuur, de windsnelheid, neerslag en de temperatuur van de ondergrond. Binnen dit afstudeeronderzoek is niet verder ingegaan op het effect van een heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag op de mechanische eigenschappen. Aanbevolen wordt om in de toekomst onderzoek te doen naar het effect van deze heterogene temperatuurverdeling in de asfaltlaag op de mechanische eigenschappen van het asfalt.

Nu duidelijk is welke parameters belangrijk zijn in het empirisch onderzoek, wordt in het volgende hoofdstuk ingegaan op dit empirisch onderzoek.

2 Appendix: Empirische onderzoeken

Het doel van het afstudeeronderzoek is het ontwikkelen van een procedure voor de bepaling van temperatuur- en tijdsvenster voor de verdichting van Nederlandse asfaltmengsels. Het idee bestaat dat er een venster van temperaturen is, en dus een tijdsvenster, waarop, met een hoge mate van waarschijnlijkheid, de beoogde mengseleigenschappen uit het ontwerp 100% bereikt kunnen worden. Daarom is er empirisch onderzoek gedaan naar de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. In het literatuuronderzoek (hoofdstuk 2) is een lijst met parameters beschreven die belangrijk zijn in dit empirisch onderzoek.

Het doel van het empirisch onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de dichtheid en mechanische eigenschappen. Het empirisch onderzoek bestaat uit het doen van laboratoriumexperimenten en het doen van metingen in de praktijk. In dit hoofdstuk zijn ten eerste de proeven en meetinstrumenten voor het empirisch onderzoek beschreven, waarna vervolgens de resultaten van het empirisch onderzoek, uit het laboratorium en de praktijkcase, zijn beschouwd. Uiteindelijk zijn de belangrijkste conclusies van het empirisch onderzoek beschreven. In de appendix naast dit rapport is de uitgebreide verslaglegging van het empirisch onderzoek, met alle bevindingen uit het laboratoriumonderzoek en de praktijkmeting, terug te vinden.

Zoals beschreven in het onderzoeksontwerp (hoofdstuk 1) is er empirisch onderzoek gedaan op een STAB 0/16 asfaltmengsel zonder PR (AC base 40/60). De materiaalsamenstelling, de gradering en het zandpunt van dit mengsel zijn weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1: Materiaalsamenstelling, gradering en zeefpunt STAB 0/16 mengsel (zonder PR)

STAB 0/16 zonder PR (AC base O1 40/60)					
Materiaalsamenstelling		Gradering		Zandpunt	
Materiaal	Percentage	Op zeef	Percentage	Op zeef	Percentage
Bestone 4/8	22,1 %	C31,5	0,0	2 mm-500 µm	20
Graniet 8/16	35,4 %	C22,4	0,0	500 µm – 180 µm	55
Rivierzand	18,4 %	C16	3,3	180 µm – 63 µm	25
Wieringervlaakzand	10,5 %	C11,2	24,4		
Zeezand	7,3 %	C8	35,0		
Wigras 40K	6,3 %	C5,6	48,9		
Bitumen 40/60	4,5 %	C4	54,6		
		2 mm	57,0		
		500 µm	64,4		
		180 µm	84,8		
		63 µm	94,0		

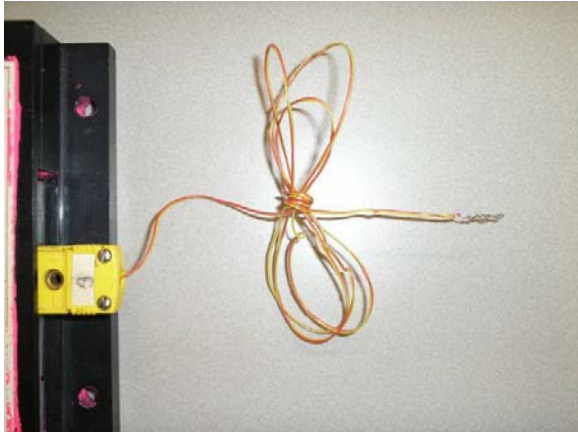
2.1 Proeven en meetinstrumenten

In deze paragraaf worden de proeven en meetinstrumenten die in het empirisch onderzoek zijn gebruikt toegelicht. Er kunnen enorme verschillen tussen verschillende verdichtingsmethoden, verschillende temperatuurmetingen en het bepalen van mechanische eigenschappen ontstaan door deze op verschillende manieren te meten of uit te voeren. Het is daarom van belang om te beschrijven welke proeven en uitgangspunten zijn gehanteerd en waarmee gemeten is. Daarom is achtereenvolgens ingegaan op de manier van verdichten, het meten van de temperatuur en de mechanische proeven in dit onderzoek. Uiteindelijk is een overzicht van de asfaltplaten gemaakt in het laboratorium en van de kernen uit de praktijkmeting weergegeven.

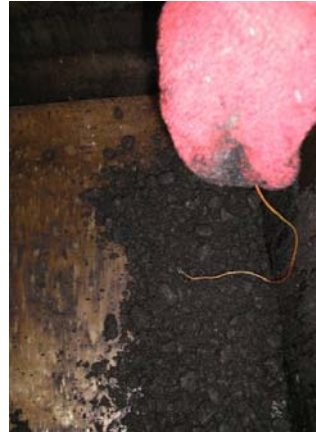
2.1.1 Temperatuur

De temperatuur van het asfalt is met thermokoppels gemeten. Het meten van de temperatuur dient inzicht te geven in de homogeniteit van de temperatuur van het asfaltmengsel. Het doel hiervan is dus om duidelijk aan te kunnen geven bij welke temperatuur verdicht wordt en hoe groot de variabiliteit van de temperatuur, in verticale en horizontale richting, van het asfalt is.

Een voorbeeld van een thermokoppeldraad aangesloten op een datalogger is weergegeven in figuur 4.1. Het principe van een thermokoppel is twee gekoppelde draden van verschillende metalen waarbij temperatuurverschillen worden omgezet in een elektrische spanning evenredig met het temperatuurverschil. In figuur 4.2 is het aanbrengen van de thermokoppels weergegeven.



Figuur 4.1: Voorbeeld thermokoppeldraden met datalogger

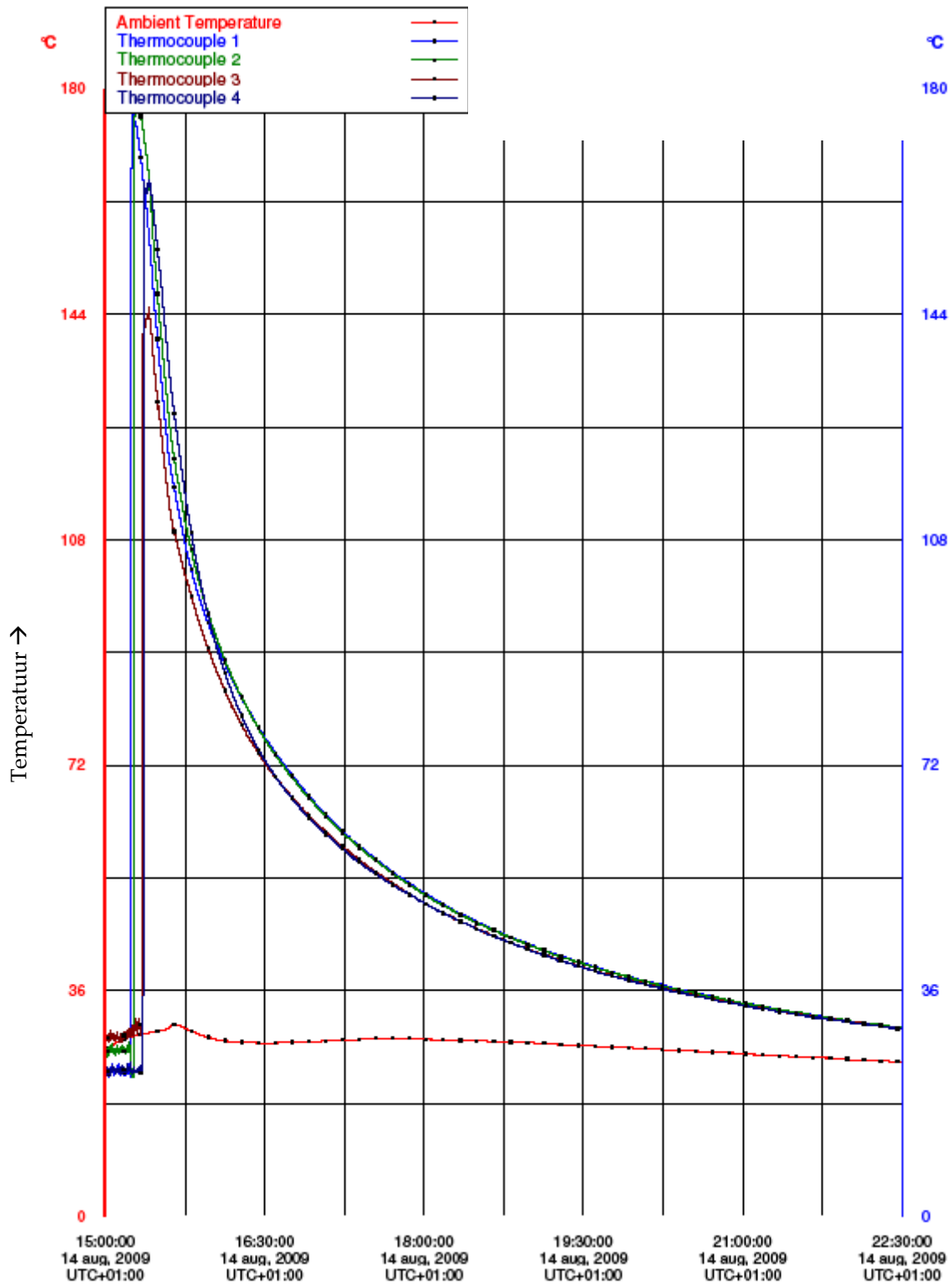


Figuur 4.2: Aanbrengen thermokoppels

Om te bepalen of de thermokoppels de juiste temperatuur meten (en doorgeven aan de datalogger) zijn de thermokoppels gekalibreerd. De uitvoering en de resultaten hiervan zijn weergegeven in bijlage 2.3. Uit deze kalibratie kan geconcludeerd worden dat de thermokoppels maximaal een afwijking hebben van 4 graden Celsius en de gemiddelde afwijking is 1,9 graad Celsius met een standaardafwijking van 1,2 graden Celsius. Voor dit onderzoek is dit voldoende, omdat in dit onderzoek niet het temperatuurvenster op één graad nauwkeurig wordt onderzocht, maar er wordt onderzocht of het fenomeen, dat de streefdichtheid wordt bereikt bij verschillende verdichtingstemperaturen maar verschillende mechanische eigenschappen tot gevolg heeft, voorkomt.

In figuur 4.3 is een voorbeeld van de output van de datalogger van de thermokoppeldraden te zien. Op de linker en rechter Y-assen is de temperatuur weergegeven en op de X-as is de tijd weergegeven, oftewel de temperatuur in de loop van de tijd is weergegeven. In dit voorbeeld zijn er 4 thermokoppels gebruikt en de rode lijn geeft de temperatuur van de omgevingstemperatuur aan (dus ongeveer de temperatuur in de kamer van de Freundl plaatverdichter). Deze temperatuur gaat even omhoog, omdat de datalogger na verdichting even op de asfaltplaat geplaatst moet worden, om de plaat uit de mal te drukken.

Afkoeling van vier thermokoppels en de omgevingstemperatuur



Figuur 4.3: Voorbeeld output thermokoppels

Tijd →

2.1.2 Verdichting

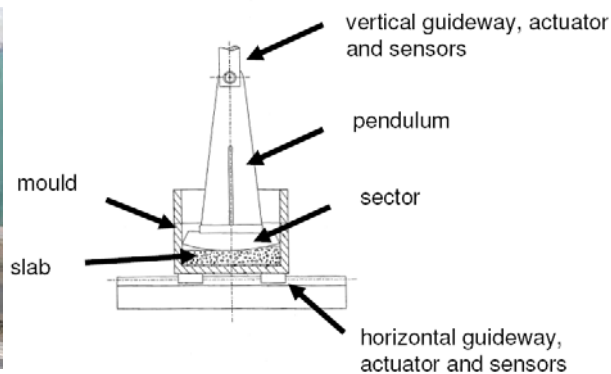
Zoals besproken in de theorie (hoofdstuk 2) zijn er voor het verdichten van asfalt verschillende mogelijkheden (impact, statisch, knedend en rollend). In dit onderzoek is verdicht met de walssegmentverdichter (de Freundl plaatverdichter WSV-2008-KW50/500). Dit is een rollende verdichting en lijkt de beste methode om de verdichting uit de praktijk in het laboratorium te simuleren; Er vinden verticale en horizontale krachten plaats, er vindt een korreloriëntatie en een beoogde verdichting plaats (Mollenhauer, 2009).

In figuur 4.4a-c zijn respectievelijk de Freundl plaatverdichter, het principe van de verdichter en het resultaat weergegeven. Het principe van de Freundl plaatverdichter is een hydraulisch heen en weer bewegende walssector die met een bepaalde kracht het materiaal, in een ook heen en weer bewegende mal, verdicht. In de mal en de walssector zijn sensoren bevestigd om de verplaatsingen en krachten te meten. De mal is een bak van 50 cm bij 50 cm en 30 cm hoog. De walssector is 50 cm breed en heeft een diameter van 1,10 m. De krachten worden gemeten door het hydraulisch systeem (druk) en de verplaatsingen worden gemeten door LVDT's (linear variable differential transformers).

De walsrolkarakteristiek van de Freundl plaatverdichter is afhankelijk van de kracht; volgens de walsrolkarakteristiek van VBW-asfalt (2000) (zie formule 2.2) is bij een kracht van 15 kN de walskarakteristiek bijvoorbeeld 24 en bij 30 kN is deze walskarakteristiek bijvoorbeeld 49.



Figuur 4.4a: Freundl plaatverdichter



Figuur 4.4b: Principe (Martus en Nussbaum, 2009)

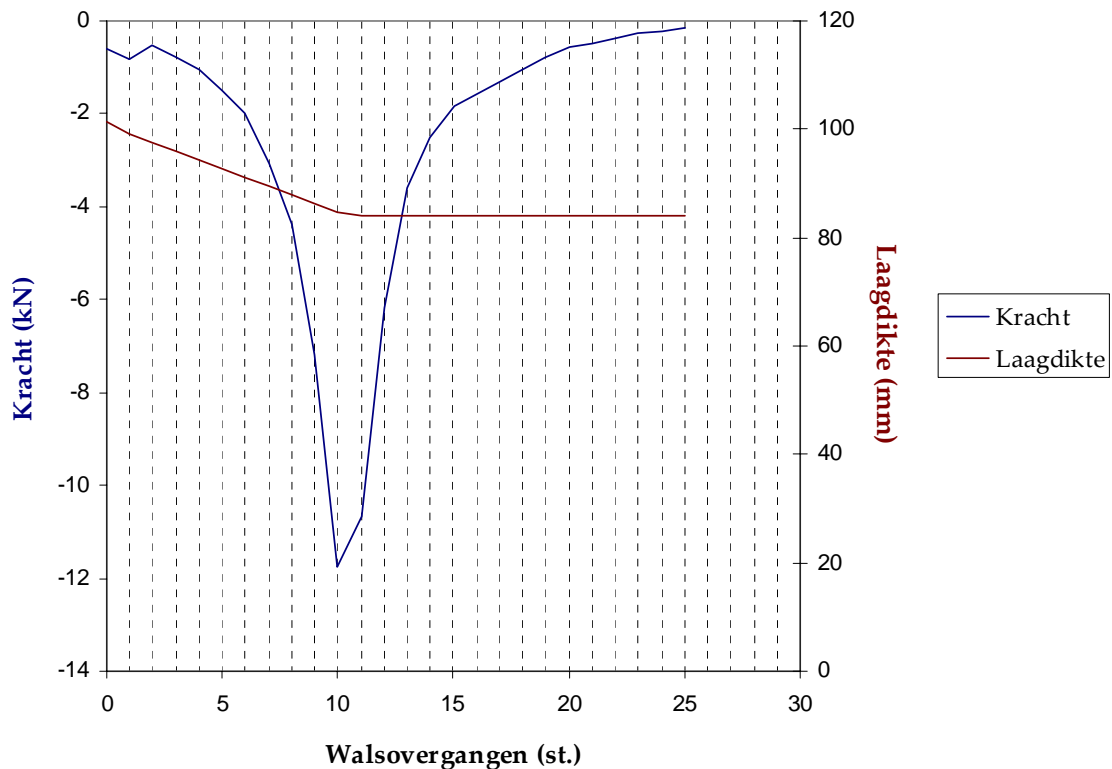


Figuur 4.4c: Resultaat

Van het proces van het verdichten met de Freundl plaatverdichter is een fotoreportage gemaakt om te laten zien hoe het verdichten met de Freundl plaatverdichter gaat. In bijlage 2.1 is deze fotoreportage weergegeven van het proces met de Freundl plaatverdichter.

In figuur 4.5 is een voorbeeld van de uitvoer van een proef met de Freundl van een STAB 0/16 mengsel weergegeven. Op de linker Y-as kan de kracht (in kN) worden afgelezen, op de rechter Y-as de laagdikte (in mm) en op de X-as het aantal (enkel) walsovergangen. De blauwe lijn (de naar beneden gewezen puntige lijn) geeft de kracht als functie van het aantal walsovergangen weer. De rode lijn (de relatief horizontale lijn) geeft de laagdikte als functie van het aantal walsovergangen weer. In figuur 4.5 is te zien dat de beoogde laagdikte van 100 mm naar 80 mm (rode lijn) gaat na ongeveer 10 enkele walsovergangen waarbij de kracht is opgebouwd tot 12 kN (blauwe lijn). Na het behalen van de beoogde laagdikte wordt het mengsel afgewalst met nog eens 15 enkele walsovergangen om het mengsel af te vlakken en wordt de kracht weer teruggebracht tot 0 kN.

Kracht- en laagdiktecurve Freundl walssegmentverdichter



Figuur 4.5: Voorbeeld output Freundl

Het aantal walsovergangen, de maximale belasting en de verdichtingsprogressie kunnen rechtstreeks uit de grafiek (en de data) worden afgelezen. De cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie worden berekend met respectievelijk formule 4.1 en 4.2:

$$P_{cum} = \int_1^n f(N)dx \quad \text{F4.1}$$

Waarbij:

P_{cum} = cumulatieve kracht (kN)

n = walsovergangen (st)

N = kracht per walsovergang (kN)

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^n (P \cdot \rho) \quad \text{F4.2}$$

Waarbij:

E_{tot} = Totale energie (Nm=J)

n = walsovergangen (st)

P = kracht per walsovergang (N)

ρ = dichtheidsprogressie per walsovergang (m)

Met de Freundl plaatverdichter zijn verschillende walsprocedures (instellingen) mogelijk; de Freundl plaatverdichter kan positie-gestuurd verdichten (dus tot een bepaalde laagdikte) en kracht-gestuurd verdichten (dus met een bepaalde kracht). De gekozen procedures zijn gebaseerd op voorgeschreven verdichtingsprocedures ontwikkeld in Duitsland door Dhr. Mollenhauer. Deze procedures zijn besproken in het hoofdstuk Theorie en weergegeven in figuur 3.16 en 3.17.

Er zijn een aantal testen met beide verdichtingsprocedures uitgevoerd, waaruit conclusies zijn getrokken met betrekking tot de gekozen verdichtingsprocedure. Deze testen zijn uitgebreid besproken in bijlage 2.2. Voor de positie-gestuurde verdichting is getest om in één of in twee fasen te verdichten. Er is gekozen om in twee fasen te verdichten, omdat dan een realistisch aantal walsovergangen en een realistische kracht wordt gebruikt om tot 80 mm te verdichten. Voor de kracht-gestuurde verdichting is getest met een maximale kracht van 15 kN (een lijnlast van 0,3 kN/cm) en een maximale kracht van 30 kN (een lijnlast van 0,6 kN/cm). Er is gekozen voor een maximale kracht van 15 kN, omdat de beoogde dichtheid wordt behaald en de kracht (als lijnlast) en de walsfactor goed overeenkomen met de praktijk.

Achtereenvolgens zijn de gekozen verdichtingprocedures en instellingen beschouwd. De instellingen voor de positie-gestuurde verdichting zijn weergegeven in tabel 4.2 en de instellingen voor de kracht-gestuurde verdichting zijn weergegeven in tabel 4.3.

Er is binnen beide procedures gekozen om te verdichten in een tweetal fasen; een fase waarin een voorverdichting plaatsvindt (tot ongeveer 95% verdichting) met relatief weinig kracht, zodat een korrelangschikking plaats kan vinden en een fase waarin de hoofdverdichting plaatsvindt, waarbij door het toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt. De eerste fase moet de voorverdichting door de balk van de spreidmachine simuleren en de tweede fase de hoofdverdichting door de walsen.

Ook in de literatuur wordt geconstateerd dat het verdichtingsproces in meerdere fasen plaatsvindt, hetgeen besproken is in hoofdstuk 2; in de eerste fase vindt een korrelangschikking plaats, in de tweede fase vindt de hoofdverdichting plaats en tijdens de derde fase vindt het afwalsen plaats (Van Stek en Linden, 1992; Ter Huerne, 2004; Ooms, 2008). In de Freundl plaatverdichter vinden fase 2 en 3 achter elkaar plaats door na het behalen van de eindhoogte of eindkracht nog 15 walsovergangen te laten plaatsvinden.

De positie-gestuurde verdichting vindt plaats met een maximale kracht van 50 kN. In de eerste fase wordt gestuurd op 1,60 mm verdichting per overgang, omdat tijdens de voorverdichting relatief veel verdichtingsprogressie plaatsvindt, tot een hoogte van 84 mm (is ongeveer 95% verdichting) en in de tweede fase wordt gestuurd op 0,30 mm per overgang, omdat tijdens de hoofdverdichting met de walsen relatief weinig verdichtingsprogressie plaatsvindt, tot een hoogte van 80 mm. De waarden 1,30 mm en 0,30 mm per overgang zijn gekozen op basis van ervaringen bij Ooms, zodat de beoogde dichtheden gehaald worden. De andere instellingen zijn overgenomen uit de procedures van Dhr. Mollenhauer.

Tabel 4.2: Instellingen positie-gestuurde verdichting

Instellingsmogelijkheden	Gekozen instelling
Startlast tafelaandrijving (als lijnlast)	0,04 kN/cm
Verplaatsingsnelheid van de proefvorm	240 mm/s
Pauze van de proefvorm bij richtingomkeer op tafelkeerpunt	0,2 s
Belastingssnelheid van de sector per afzonderlijke overgang	1 ^e fase: 1,60 mm per enkele overgang 2 ^e fase: 0,30 mm per enkele overgang
Maximale last	1 kN/cm
Eindhoogte van het proefstuk	1 ^e fase: 84 mm 2 ^e fase: 80 mm
Het aantal afzonderlijke overgangen met eindhoogte	15 enkele overgangen
Temperatuur proefvorm en walssegment	80 °C

De krachtverdichting vindt ook plaats in een tweetal verdichtingsfasen, met een egalisatiefase ertussen. Er vindt eerst een voorverdichting tot 84 mm plaats (positie-gestuurd) als simulering van de voorverdichting van de balk, vervolgens vindt een egalisatiefase plaats om het mengsel vlak te walsen

met relatief weinig kracht (0,02 kN/cm) en vervolgens vindt de hoofdverdichting plaats tot een maximale kracht van 15 kN (hetgeen overeenkomt met een wals van ongeveer 10.000 kg).

Tabel 4.3: Instellingen kracht-gestuurde verdichting

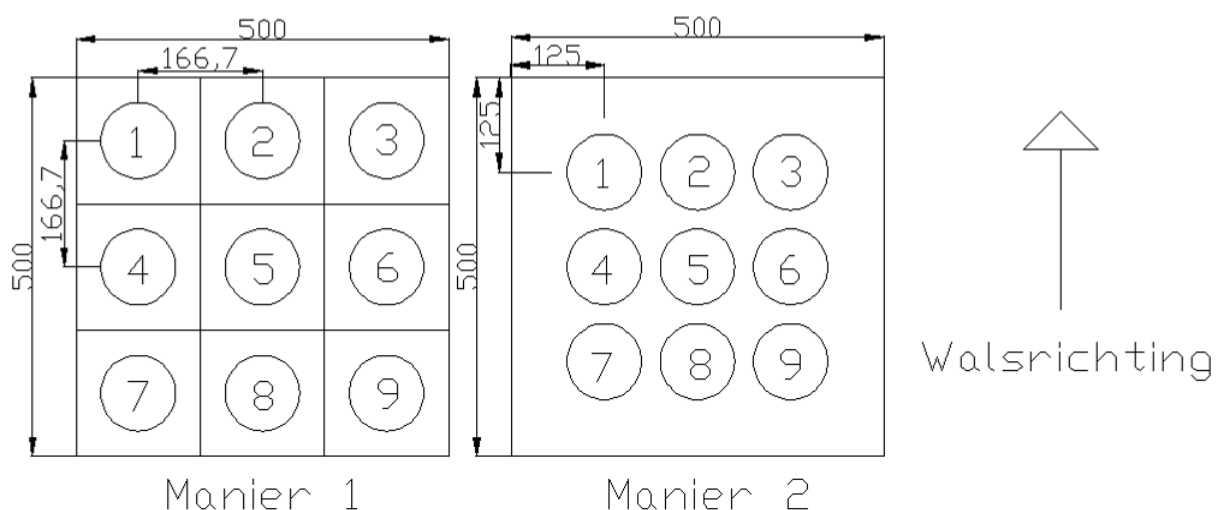
Instellingsmogelijkheden		Gekozen instelling
Verplaatsingsnelheid van de proefvorm		240 mm/s
Pauze van de proefvorm bij richtingomkeer op tafelkeerpunt		0,2 s
Voorverdichting	Belastingsnelheid van de sector per afzonderlijk overgang	0,1 mm per enkele overgang
	Voorcompressielast als lijnlast	0,1 kN/cm
	Aantal afzonderlijke overgangen met voorlast	2 enkele overgangen
	Ontlastingsnelheid per afzonderlijke overgang	
Egaliseren	Verplaatsingsnelheid van proefvorm bij hoofdbelasting	0,1 mm per enkele overgang
	Belasting voor de egalisatiefase als lijnlast	0,02 kN/cm
Hoofdverdichting	Aantal afzonderlijke overgangen voor de egalisatiefase	15 enkele overgangen
	Hoofdcompressielast als lijnlast	0,30 kN/cm
	Aantal afzonderlijke overgangen tot aan eindlast	15 enkele overgangen
	Aantal afzonderlijke overgangen voor de ontlasting	15 enkele overgangen

2.1.3 Proefstukken en dichtheid

De platen verdicht met de Freundl plaatverdichter zijn 50 bij 50 cm waar negen kernen uit geboord moeten worden om te beproeven. Er zijn twee mogelijkheden om de boorkernen uit de plaat te boren in dit onderzoek beschouwd. Deze zijn weergegeven in figuur 4.6 (maten in mm):

1. Het verdelen van de plaat in 9 zones en uit elk midden van de zone een kern te boren (links);
2. Uit de randen 12,5 cm. en hart op hart 12,5 cm. (rechts).

Manieren van boren



Figuur 4.6: Manieren van boren (maten in mm)

Er is gekozen voor methode 2 omdat de randen van de plaat minder representatief zijn voor de kwaliteit van het asfalt dan het midden van de plaat. Als de plaat in zones wordt verdeeld, zitten de kernen relatief veel aan zijkant van de plaat.

De kernen zijn van links naar rechts, en van voor naar achter (bezien vanuit de walsrichting) genummerd. Bij de analyse worden deze nummers van de kernen gebruikt.

De eisen aan de proefstukken zijn volgens NEN-EN 12697-23 (slijtproef) en NEN-EN 12697-27 (triaxiaalproef) en de RAW standaard (dichtheid) als volgt:

- Het proefstuk zal voor de slijtproef een diameter van 100 mm moeten hebben plus of min 3 mm afgerond op millimeters;
- Het proefstuk zal voor de slijtproef een hoogte tussen de 35 en 75 mm moeten hebben. De beoogde proefstukhoogte is gekozen op 60 mm (plus of min 2 mm afgerond op millimeters), omdat dit de standaard proefstukhoogte is;
- Voor de triaxiaalproef dient de hoogte-diameter een ratio van 0,6 te hebben. Bij een diameter van 100 mm betekent dit dus een hoogte van 60 mm (plus of min 2 mm afgerond op millimeters);
- Het proefstuk mag bij een triaxiaalproef in hoogte niet meer dan 1,0 mm variëren en in diameter niet meer dan 2 mm.
- De streefdichtheid (beoogde dichtheid) van een STAB 0/16 mengsel is 2360 kg/m³. De maximale afwijking hiervan is 30 kg/m³, dus het minimum is 2330 kg/m³ en het maximum is 2390 kg/m³.

De eisen aan de proefstukken zijn dus tweërlei. Ten eerste dienen de proefstukken de juiste afmetingen te hebben en ten tweede worden er eisen aan de verdichtingsgraad gesteld. Binnen dit onderzoek zullen proefstukken met een te hoge of lage dichtheid natuurlijk wel beproefd worden, om het effect van een hoge of lage dichtheid (bereikt door te verdichten bij een andere temperatuur dan voorgeschreven) te laten zien. Er zijn dus boorkernen met een diameter van 100 mm worden geboord en de kernen worden tot 60 mm hoogte geslepen (volgens NEN-EN 12697-23 en NEN-EN 12697-27)

Daarnaast geeft Head (1980) nog twee belangrijke aspecten om op te letten bij het bereiden van proefstukken; de grootte van het proefstuk en de dikte van het proefstuk.

Tabel 4.4 geeft de minimale grootte van het proefstuk in relatie tot de maximale korrelgrootte. Volgens deze tabel dient de minimale grootte van het proefstuk 2 kg te zijn bij een 0/16 mengsel. Het proefstuk in de Freundl plaatverdichter is 0,25 m², dus bij een dikte van 80 mm zal het proefstuk ongeveer 50 kg zijn. Dit betekent dat het proefstuk groot genoeg is in relatie tot de grootste korrel.

Tabel 4.4: Relatie grootste korrel en de grootte van het proefstuk (Head, 1980)

Grootste korrel (mm)	Minimale grootte van het proefstuk
< 2	100 g
3,35	150 g
5	200 g
6,3	200 g
10	500 g
14	1 kg
20	2 kg
28	6 kg
37,5	15 kg
50	35 kg
63	50 kg

Daarnaast adviseert Head (1980) minimaal een ratio van vijf tussen de maximale korrelgrootte en minimale dikte van het proefstuk om een homogeen materiaalgedrag te laten zien. Dit betekent dat een

proefstukdikte van 80 mm dik genoeg is bij een maximale korrel van 16 mm om een homogeen materiaalgedrag te vertonen. Het beoogde STAB 0/16 mengsel (zonder PR) van 80 mm dik voldoet hier dus aan.

Opgemerkt moet worden dat Head (1980) zich richt op grondmechanische materialen en niet op asfaltmengsels, waarin ook vloeistoffen aanwezig zijn.

Vervolgens zijn de boorkernen onder en boven water gewogen om de dichtheid van de proefstukken te bepalen. Ook zijn de geboorde proefstukken opgemeten om het volume te bepalen. Van de proefstukken worden de diameter, twee keer aan de onderkant, in het midden en aan de bovenkant (dus in totaal 6 diameter metingen) en de hoogte (op 4 plaatsen) bepaald. Hiermee kan worden nagegaan of de proefstukken een gelijke hoogte en diameter hebben.

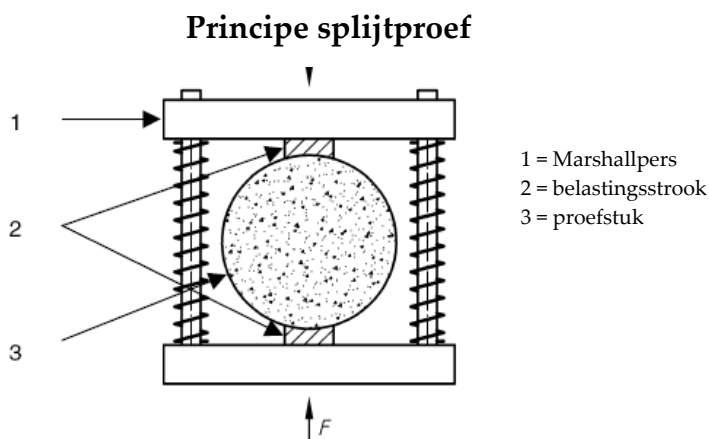
Daarna zijn de kernen geslepen tot een hoogte van 60 mm, waarna de kernen opnieuw onder en boven water zijn gewogen om het effect van het slijpen op de dichtheid te bepalen. Per 'onderzoeksbatch' (per verdichtingstemperatuur) is voor één plaat voor en na het slijpen de dichtheid en het volume bepaald door middel van boven en onder water wegen en de diameter- en hoogtemetingen. Het doel hiervan is te onderzoeken welke effecten het slijpen heeft op de dichtheid en het volume van de kernen. Aan de hand hiervan kan bepaald worden hoeveel materiaal eraf geslepen wordt en wat de dichtheidsverandering is. Voor de andere platen zal alleen de dichtheid na het slijpen worden bepaald, oftewel de proefstukdichtheid.

2.1.4 Mechanische eigenschappen

Op de asfaltplaten zullen een tweetal mechanische proeven worden uitgevoerd; een triaxiaalproef en een splijtproef. Deze mechanische proeven dienen uitgevoerd te worden op proefstukken (met een diameter van 100 mm en een dikte van 60 mm). Per plaat zullen 3 triaxiaalproeven (met de Nottingham Asphalt Tester) worden uitgevoerd en 6 splijtproeven (met de Marshallpers), oftewel er dienen 9 boorkernen uit de plaat te worden geboord. Ten eerste is ingegaan op de principes en uitgangspunten van de splijtproef, waarna vervolgens de principes en uitgangspunten van de triaxiaalproef zijn beschouwd.

Splijtproef

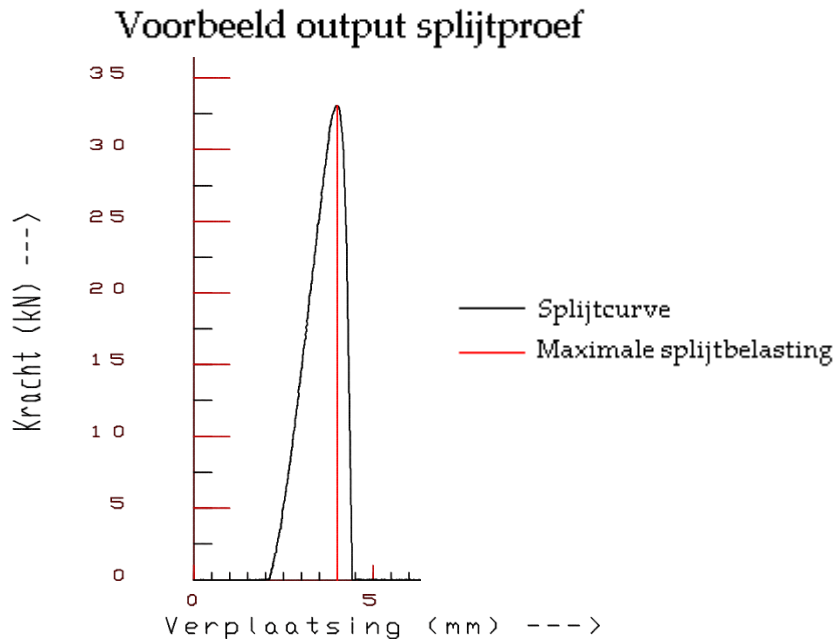
In de splijtproef wordt een cilindrisch proefstuk diametraal belast door deze met een constante snelheid van 0,85 mm per seconde te belasten (zie figuur 4.7). Tijdens de proef wordt een belastingsvervormingscurve ontwikkeld, waaruit de maximale kracht en de splijtsterkte kan worden bepaald, waarbij die splijtsterkte een benadering van de treksterkte is. De oppervlakte onder de belastingsvervormingskromme dient als maat voor de splijtenergie en de scheurtaaiheid (VBW-asfalt, 2000).



Figuur 4.7: Principe splijtproef

In figuur 4.8 is een voorbeeld van de output van een slijtproef weergegeven. In de figuur is de kracht die uitgevoerd wordt om het proefstuk te belasten (in kN) uitgezet tegen de verplaatsing, oftewel de vervorming (slijting) als gevolg van de uitgeoefende kracht (in mm). De output van deze proef is de maximale belasting om te slijten.

Met de diameter en de hoogte van het proefstuk en deze maximale belasting om te slijten kunnen de slijtsterkte, slijtenergie en scheurtaaiheid respectievelijk met formule 4.3, 4.4 en 4.5 worden berekend.



Figuur 4.8: Voorbeeld output slijtproef

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad \text{F4.3}$$

Waarbij:

ITS = indirecte treksterkte (= slijtsterkte)

P = maximale slijtkracht

D = diameter van het proefstuk

H = hoogte van het proefstuk

$$S_e = \int_0^{\alpha} f(x) dx \quad \text{F4.4}$$

Waarbij:

S_e = slijtenergie

$f(x)$ = verplaatsing (mm) per kracht (kN)

$$S_t = \frac{S_e}{DH} \quad \text{F4.5}$$

Waarbij:

S_t = scheurtaaiheid

S_e = slijtenergie

D = diameter van het proefstuk

H = hoogte van het proefstuk

Op basis van verschillende materiaalkarakteristieken heeft Schapery een formule ontwikkeld om de scheursnelheid van een visco-elastisch materiaal te voorspellen (Molenaar, 1983; De Bondt, 1999). De-

ze scheursnelheid is o.a. afhankelijk van de karakteristieken van het materiaal, de splijtsterkte en de scheurtaaiheid. Rijkswaterstaat (RWS) gebruikt de formule op een praktisch werkbaar manier in besteksomschrijvingen om de scheursnelheid te berekenen op basis van de splijtsterkte en de scheurtaaiheid. De uitkomsten hiervan zijn alleen bruikbaar om relatieve verschillen in scheursnelheid te onderzoeken. De formule die RWS in haar besteksomschrijvingen gebruikt om de scheursnelheid te berekenen is weergegeven in formule 4.6.

$$S_v = \frac{1}{ITS^2} \cdot \frac{1}{(2 \cdot S_t)^{1,5}} \quad \text{F4.6}$$

Waarbij:

S_v = Scheursnelheid

ITS = splijtsterkte

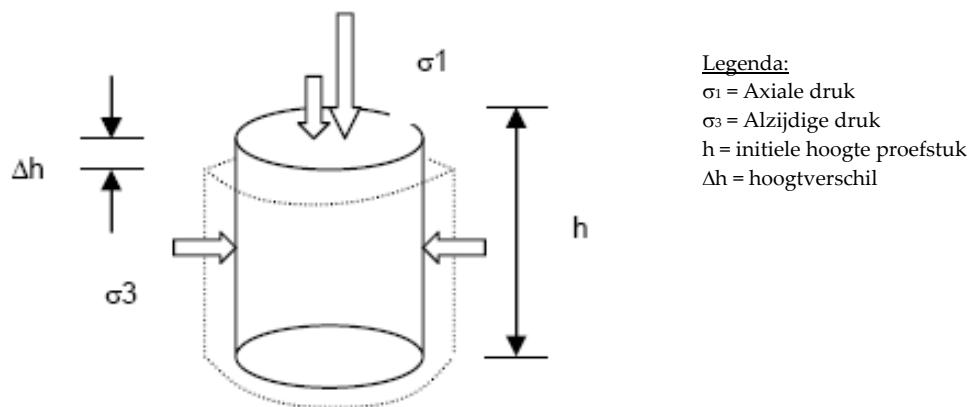
S_t = scheurtaaiheid

De splijtproef is uitgevoerd volgens EN-12697-23, waarbij opgemerkt moet worden dat de proefstukken geconditioneerd zijn op 5 °C voor minimaal 4 uur.

Triaxiaalproef

Het zogenaamde spanningsafhankelijke vervormingsgedrag van het asfaltmengsel kan worden bepaald met behulp van de triaxiaalproef. Met de triaxiaalproef wordt de weerstand van het materiaal tegen de opbouw van permanente vervorming bepaald. Op een proefstuk worden radiale en axiale belastingen uitgeoefend. Gedurende de proef wordt de toename van de vervorming in axiale richting gevolgd. Het resultaat van de proef is een kruipcurve, oftewel de relatie tussen de vervorming op een bepaald moment gedurende de puls en de hoeveelheid opgelegde belastingspulsen sinds de start van de proef. Het principe van de triaxiaalproef is weergegeven in figuur 4.9.

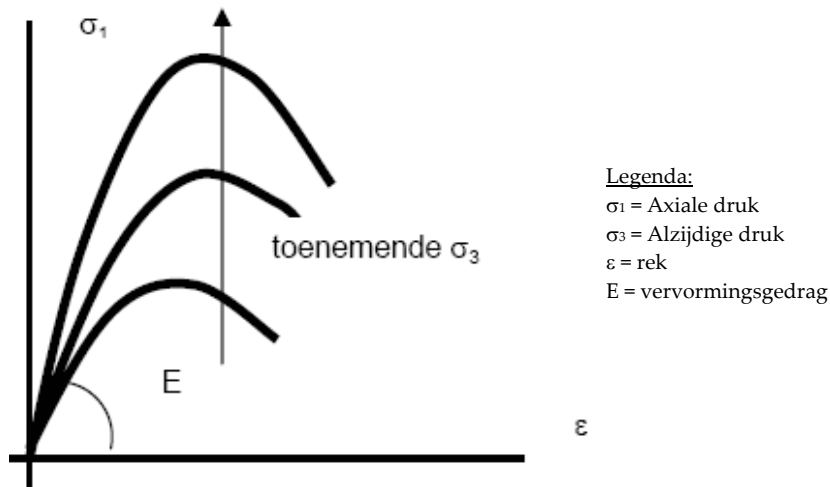
Principe triaxiaalproef



Figuur 4.9: Principe triaxiaalproef (Molenaar en Houben, 2003)

Er wordt dus een alzijdige druk (σ_3) en een axiale druk (σ_1) aangebracht op het proefstuk, waarbij vervolgens de vervormingen waargenomen worden. Het vervormingsgedrag tijdens de triaxiaalproef ziet er uit als figuur 4.10, oftewel de E-waarde neemt toe bij een toenemende alzijdige druk.

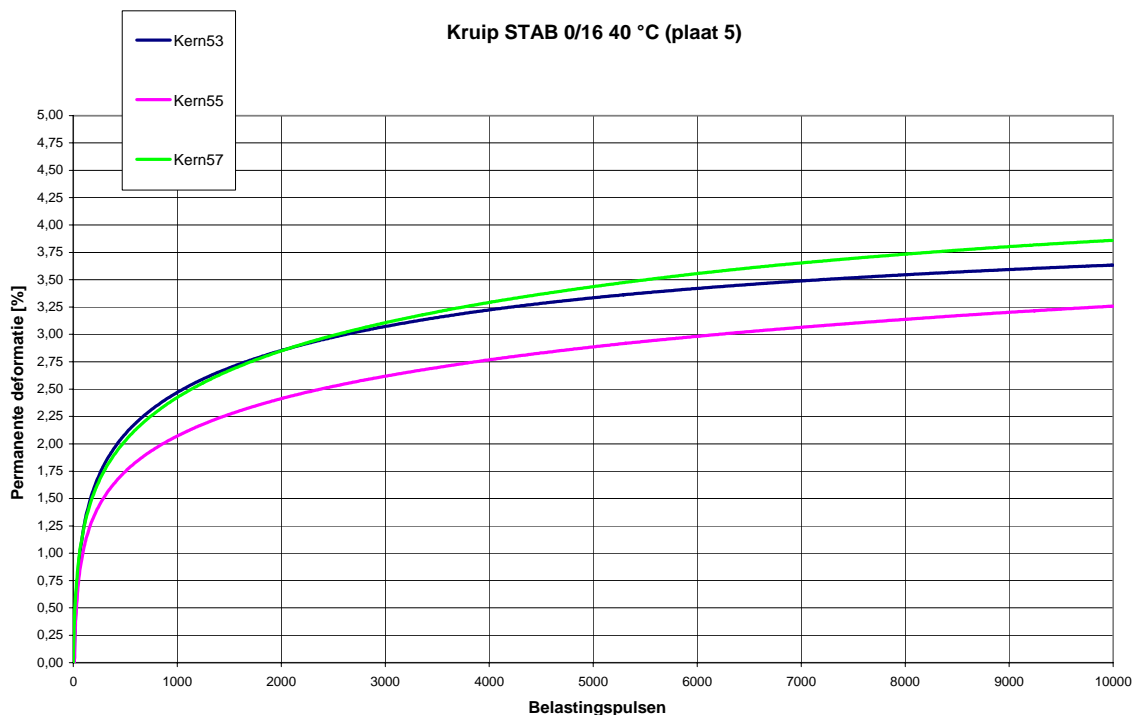
Vervormingsgedrag triaxiaalproef



Figuur 4.10: Vervormingsgedrag triaxiaalproef (Molenaar en Houben, 2003)

Met de triaxiaalproef wordt de weerstand van het materiaal tegen de opbouw van permanente vervorming bepaald, oftewel de vervormingsgevoeligheid van een mengsel onder herhaalde omstandigheden.

In figuur 4.11 is een voorbeeld van de output van de triaxiaalproef weergegeven (een kruipcurve). In de figuur is het aantal belastingspulsen uitgezet tegenover de procentuele permanente deformatie, waaruit een weerstand tegen spoorvorming kan worden bepaald. Er zijn twee methoden om de vervormingsgevoeligheid te bepalen; (1) volgens de bepaling van de helling van de zogeheten kruipcurve en (2) volgens de bepaling van de rek per puls (volgens de kleinste kwadratenmethode) en de permanente deformatie na 10.000 puls.



Figuur 4.11: Voorbeeld output triaxiaalproef

De output van de triaxiaalproef is, een maat om de spoorvormingsgevoeligheid te bepalen, de cumulatieve rek, verkregen uit de zogeheten kruipcurve. De cumulatieve rek kan berekend worden met formule 4.7.

$$\varepsilon_n(N) = \frac{\Delta h(N)}{h} \quad \text{F4.7}$$

Waarbij:

$\varepsilon_n(N)$ = cumulatieve rek na n lastherhalingen

$\Delta h(N)$ = hoogteverschil na n lastherhalingen

h = initiele hoogte bij aanvang van de test

De triaxiaalproef is uitgevoerd volgens EN-12697-25, waarbij de volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- De temperatuur waarbij de triaxiaalproef plaatsvindt is 40 °C. Deklagen worden veelal beproefd bij 50 a 60 °C en onder- en tussenlagen bij 40 °C. Vooraf dient het proefstuk minimaal 4 uur te zijn geconditioneerd op de beproevingstemperatuur;
- Volgens de norm dient het proefstuk met een sinuspuls te worden belast. Binnen de NAT (Nottingham Asphalt Tester) kan alleen een blokpuls-belasting worden uitgeoefend. Er is gekozen om de piek van de blokpuls gelijk te houden aan de piek van de sinuspuls, en dus zal het proefstuk twee keer zo zwaar worden belast als volgens de norm. Hierdoor zal het proefstuk worden belast met een (axiale) blokpuls van 0,45 MPa met een belastingsduur van 400 ms per seconde (dus een rustduur van 600 ms). Hierbij zal een opsluitspanning van 0,05 MPa worden toegepast;
- Een wrijvingsreductie van een laag plastic en een laag folie met daartussen siliconenvet (Erens, 2002);
- Het aantal lastherhalingen is 10.000 zonder voorbelastingen.

Volgens de norm van de triaxiaalproef kan na 2 dagen het proefstuk worden beproefd. Volgens de meeste CE-markeringen is dit 2 weken. Binnen dit onderzoek is gekozen om de CE-markering aan te houden en dus dienen na het slijpen de proefstukken 2 weken te rusten en uit te werken in de koeling. Volgens de normen dienen de proefstukken in een ruimte met een temperatuur tussen de 5 en 25 graden Celsius te worden gelegd. Bij Ooms is er een koelruimte van 7 graden Celsius, dus in dit onderzoek zullen de proefstukken worden gelegd in een ruimte van 7 graden Celsius.

Na het koelen van de proefstukken zullen de proefstukken geconditioneerd moeten worden voor minimaal 4 uur. Voor de triaxiaalproef dienen de proefstukken geconditioneerd te worden op 40 graden Celsius en voor de splijtproef dienen de proefstukken geconditioneerd te worden op 5 graden Celsius.

2.1.5 Conclusies proeven en meetinstrumenten empirisch onderzoek

In het laboratorium zijn STAB 0/16 mengsels (zonder PR) verdicht met de walssegmentverdichter (de Freundl plaatverdichter WSV-2008-KW50/500) tot platen van 50 cm bij 50 cm. De temperatuur van het asfalt is gemeten met behulp van thermokoppels. Om de mechanische eigenschappen te bepalen zijn 6 splijtproeven en 3 triaxiaalproeven per plaat uitgevoerd. In totaal zijn in het laboratorium 24 asfaltplaten met de Freundl plaatverdichter gemaakt. Variabele karakteristieken van deze platen zijn (1) de manier van verdichten en (2) de asfalttemperatuur bij het begin van verdichten. In tabel 4.5 zijn de karakteristieken per plaat weergegeven. De platen 2 en 5 zijn verdicht in 1 fase om te testen, en zijn verder niet gebruikt in de analyse. Plaat 3 is mislukt, omdat vergeten was om de mal aan te brengen en van plaat 18 is geen data verkregen, omdat er een stekker loszat. Ook deze platen zijn verder niet in de analyse meegenomen.

Tabel 4.5: Karakteristieken platen laboratorium

Plaatnummer	Verdichting	Verdichtingstemperatuur begin verdichten (°C)	Opmerkingen
1	Positie-gestuurde verdichting	139	
2	"	147	Test: verdichten in 1 fase
3	"	135	Plaat mislukt
4	"	149	
5	"	98	
6	"	120	Test: verdichten in 1 fase
7	"	104	
8	"	102	
9	"	126	
10	"	82	
11	"	92	
12	"	80	
13	"	158	
14	"	166	
15	"	170	
16	Kracht-gestuurde verdichting	140	
17	"	135	
18	"	137	Geen data verkregen
19	"	138	
20	"	140	
21	"	88	
22	"	89	
23	"	169	
24	"	166	

In tabel 4.6 zijn de karakteristieken per baan van de praktijkmeting weergegeven. Bij de praktijkmeting zijn 14 kernen in 3 banen die bij verschillende temperaturen zijn verdicht, geboord, dus in totaal 42 kernen. In de kolom opmerkingen zijn de kernen genoemd die onvoldoende laagdikte hebben gehaald om te kunnen beproeven. De temperatuur van het asfalt is wederom gemeten met behulp van thermokoppels. Om de mechanische eigenschappen te bepalen is, om tijdsredenen, gekozen om alleen splijtproeven te doen.

Tabel 4.6: Karakteristieken kernen praktijkmeting

Baan	Proefstukken	Verdichtingstemperatuur begin verdichten (°C)	Opmerkingen
1	1-14	130	Proefstukken 13 en 14 hebben onvoldoende laagdikte
2	15-28	110	Proefstukken 20, 23,24,25, 28 hebben onvoldoende laagdikte
3	29-42	90	Proefstuk 36 heeft onvoldoende laagdikte

2.2 Laboratoriumonderzoek

In deze paragraaf zijn de resultaten van het laboratoriumonderzoek weergegeven en geanalyseerd. Ten eerste zijn de resultaten van de positie-gestuurde verdichting en de kracht-gestuurde verdichting beschouwd. Hierbij is ingegaan op de temperatuur van het asfaltmengsel, de verdichting met de Freundl plaatverdichter, de dichtheid en de mechanische eigenschappen. Daarna zullen de resultaten van de positie- en kracht gestuurde verdichting onderling worden vergeleken. Vervolgens zal apart op een tweetal aspecten worden ingegaan, namelijk het elastisch effect en de textuur. Uiteindelijk zijn de conclusies van het laboratoriumonderzoek besproken.

2.2.1 Positie gestuurde verdichting

2.2.1.1 Temperatuur

De temperatuur van het asfaltmengsel tijdens verdichting met de Freundl plaatverdichter is gemeten met behulp van thermokoppels. Het aanbrengen en het principe van de thermokoppels is beschreven bij de proefbeschrijvingen en meetinstrumenten in paragraaf 4.1. In figuur 4.12 is het concept van het aanbrengen van de thermokoppels in de verticale richting van het asfalt weergegeven. Tijdens het aanbrengen van het (losse) asfaltmengsel in de mal van de Freundl plaatverdichter worden de thermokoppels in de onderkant, het midden en de bovenkant van de asfaltlaag aangebracht.

Aanbrengen thermokoppels



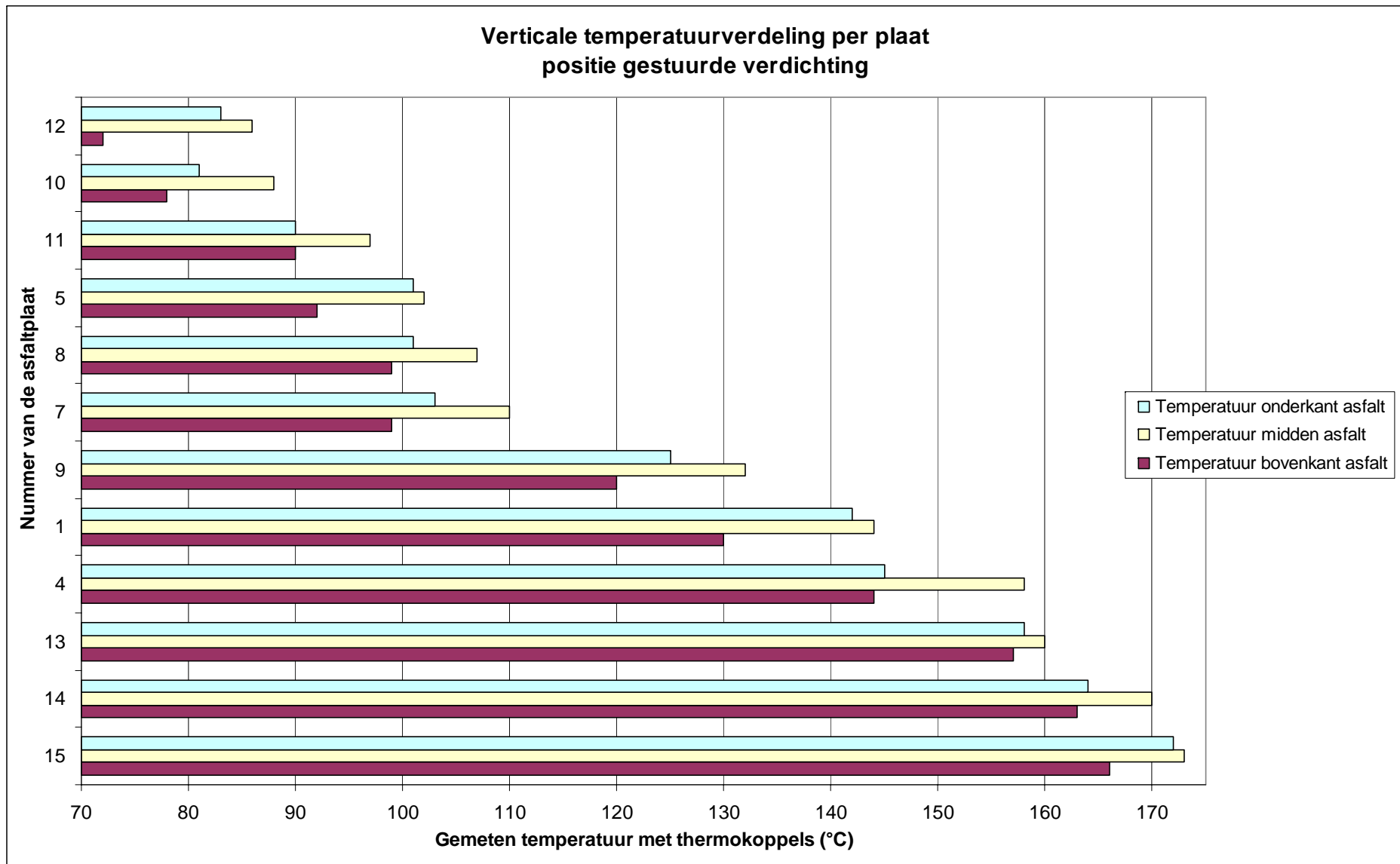
Figuur 4.12: Concept aanbrengen thermokoppels aan de (linker)zijkant van de asfaltlaag

In deze paragraaf worden achtereenvolgens de resultaten van de metingen met de thermokoppels van de positie gestuurde verdichting besproken. Hierbij zijn een drietal aspecten beschouwd; de homogeniteit van de temperatuur van het asfaltmengsel in de verticale richting van het asfaltmengsel tijdens verdichting, de afkoeling tijdens de verdichting en de tijd waarin het asfaltmengsel afkoelt van 130 °C tot 30 °C.

De temperatuur van de onderkant, het midden en de bovenkant van de verschillende asfaltplaten zijn weergegeven in figuur 4.13. De gemiddelde temperaturen van de platen variëren van 80 °C tot 170 °C. Het maximale gemeten temperatuurverschil binnen een asfaltplaat is 14 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 9 °C. De standaardafwijking ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van het asfalt is gemiddeld over alle platen 5 °C variërend van 2 tot 8 °C.

Het gemiddelde aantal walsovergangen per fase met de Freundl plaatverdichter bij de positie gestuurde verdichting is 28 enkele walsovergangen met een tijdsduur van 2,3 seconden dus gemiddeld duurt de verdichting met Freundl plaatverdichter ongeveer een minuut. Tijdens deze verdichting koelt het asfaltmengsel gemiddeld over alle platen 2 °C af, dus de afkoeling van het asfaltmengsel tijdens de verdichting is nihil te noemen.

De tijd die het asfaltmengsel nodig heeft om van ongeveer 130 °C naar 30 °C af te koelen varieert van 200 tot 400 minuten en gemiddeld is dit 350 minuten met een standaardafwijking van 70 minuten. Deze grote variatie is een gevolg van het moment wanneer de plaat in de koeling is gezet en het verschil in temperatuur bij verdichten; een onverdicht asfaltmengsel koelt namelijk sneller af dan verdicht asfalt.



Figuur 4.13: Temperatuur in de bovenkant, het midden en de onderkant van de verschillende asfaltplaten van de positie gestuurde verdichting

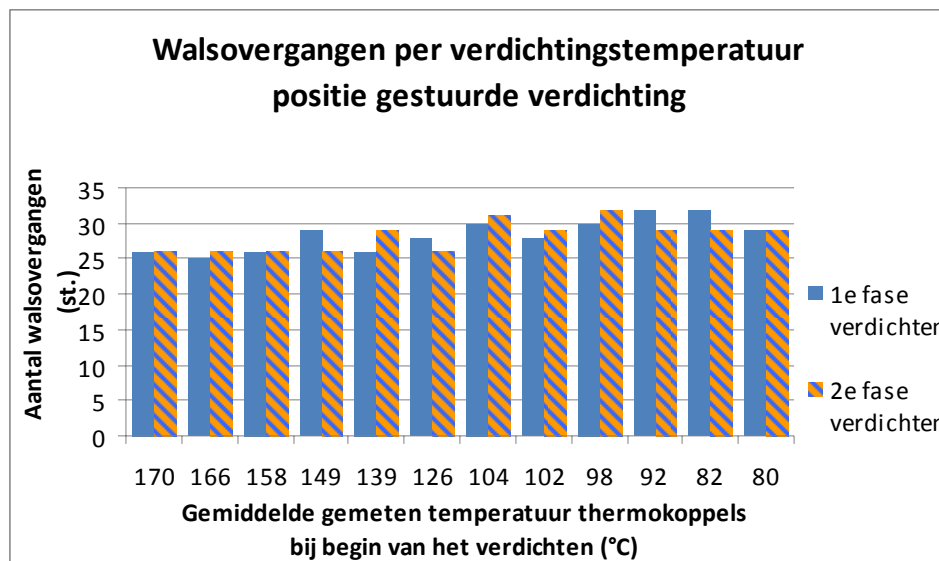
2.2.1.2 Verdichting

Achtereenvolgens worden de resultaten van de positie gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter weergegeven. Zoals aangegeven is er verdicht in twee fasen, zodat in de eerste fase een korrelrangschikking plaatsvindt, waarbij de stenen langs elkaar moeten kunnen glijden en in de tweede fase vindt de werkelijke verdichting plaats, waarbij door het toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt.

Zoals beschreven in de analyselij (paragraaf 2.5) zijn de vergelijkingscriteria voor de resultaten van de Freundl plaatverdichter het aantal walsovergangen, de maximale belasting, de verdichtingsprogressie, de cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie (figuur 4.1). Bij de positie-gestuurde verdichting wordt de verdichtingsprogressie gestuurd en worden de andere variabelen met elkaar vergeleken.

N.B. De temperaturen gemeten met de thermokoppels zijn gemiddeld en deze temperatuur is weergegeven op de X-assen. Opgemerkt moet worden dat de thermokoppels aan de zijkant van de Freundl plaatverdichter de temperatuur hebben gemeten, en het midden van de asfaltplaat zal nog een hogere temperatuur hebben.

In figuur 4.14 zijn het benodigde aantal walsovergangen per verdichtingstemperatuur weergegeven. Hierbij is te zien dat er geen tot weinig verschil tussen de verschillende verdichtingstemperaturen zit in het aantal walsovergangen dat nodig is om tot een laagdikte van 80 mm te verdichten. De norm voor de rollende verdichting (EN 12697-33) geeft aan dat het goed is om met 10 tot 50 walsovergangen te verdichten (per fase) en zoals te zien is in de figuur vallen alle resultaten binnen deze norm.

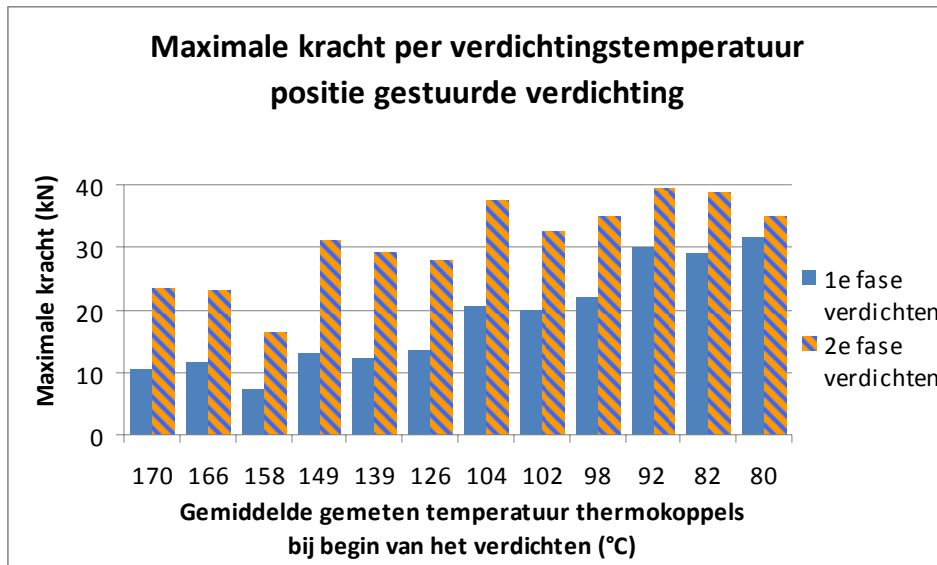


Figuur 4.14: Walsovergangen per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

In figuur 4.15 is de maximale kracht per walfase per verdichtingstemperatuur weergegeven. Hieruit valt te concluderen dat er meer kracht nodig is wanneer de verdichtingstemperatuur afneemt. Een logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen meer viskeus zijn en er dus meer kracht nodig is om te verdichten. Krachten in de Freundl plaatverdichter die boven de 30 kN liggen zijn in de praktijk vrijwel ondenkbaar, omdat er dan zo'n zware wals nodig is die in de praktijk niet verkrijgbaar is. Dit is het geval bij verdichtingstemperaturen lager dan 104 °C.

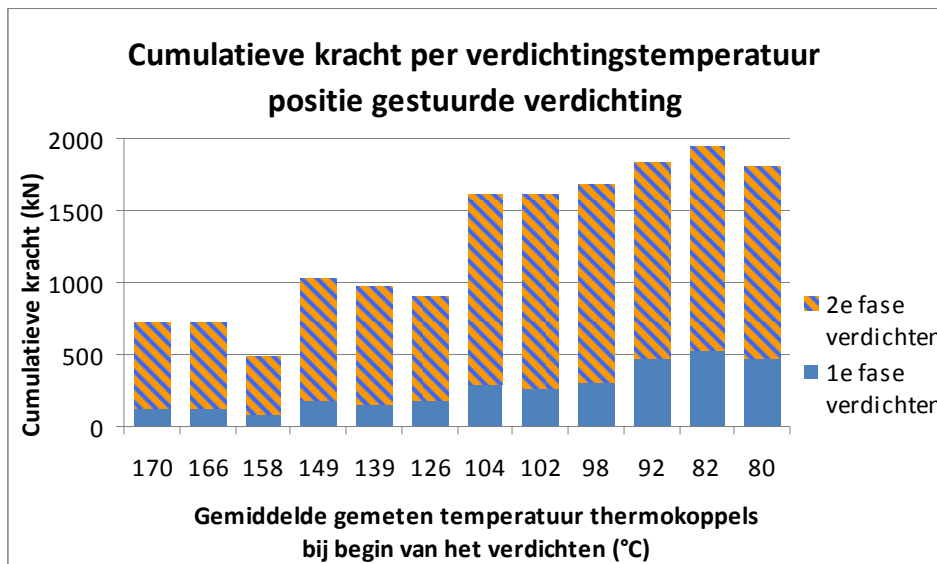
Bij verdichtingstemperaturen hoger dan 149 °C is er maar weinig kracht nodig om het asfaltmengsel te verdichten. Bij deze temperaturen zal er dus met een lichtere wals verdicht moeten worden (ongeveer 6000 kg), anders zal het mengsel vet slaan. Vet slaan van het asfalt is het principe dat slappe mortel

samen met de lucht het mengsel uitgedreven wordt i.p.v. dat de mortel aan het aggregaat hecht (Van Stek en Linden, 1992).



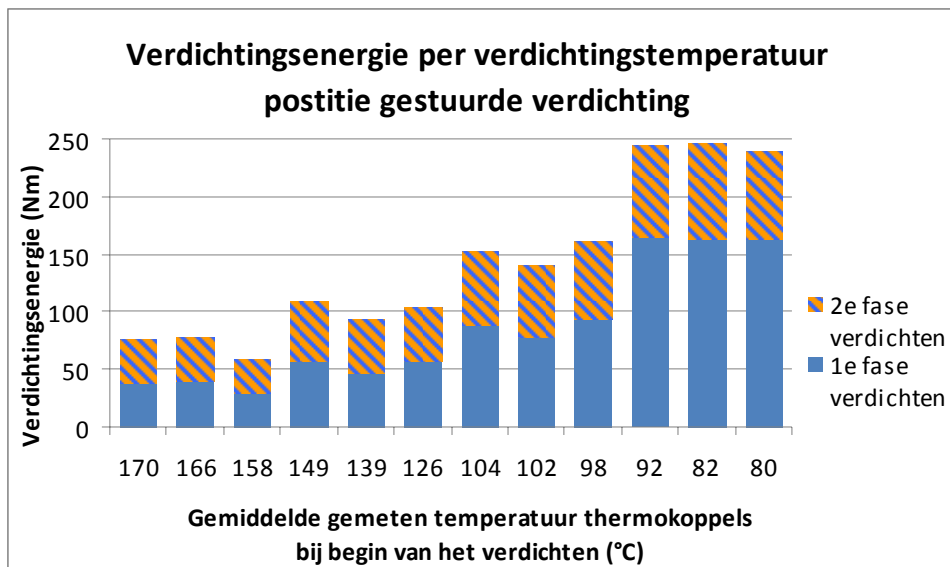
Figuur 4.15: Maximale kracht per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

In figuur 4.16 is de cumulatieve kracht per verdichtingstemperatuur weergegeven. De cumulatieve kracht is de totale kracht (in kN) die gebruikt is om het mengsel (tot 80 mm) te verdichten. Hierbij is, evenals bij de maximale kracht die nodig is om te verdichten, te zien dat de cumulatieve kracht toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische reden hiervoor is, net zoals bij de maximale kracht, dat de bitumen minder viskeus zijn en daarmee makkelijker verwerkbaar.



Figuur 4.16: Verdichtingsenergie per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

In figuur 4.17 is de verdichtingsenergie per verdichtingstemperatuur weergegeven. De verdichtingsenergie is de energie (J=Nm) die gebruikt is om het mengsel (tot 80 mm) te verdichten, oftewel het product van de verdichtingskracht (N) en de verdichtingsprogressie (m). Hierbij valt op dat de trend overeenkomt met de maximale kracht en de cumulatieve kracht, oftewel bij een afnemende verdichtingstemperatuur, neemt de verdichtingsenergie die nodig is om tot 80 mm te verdichten toe. De trend is daarentegen wel een stuk duidelijker, er is veel meer energie nodig om te verdichten bij een temperatuur van 80-90 °C.



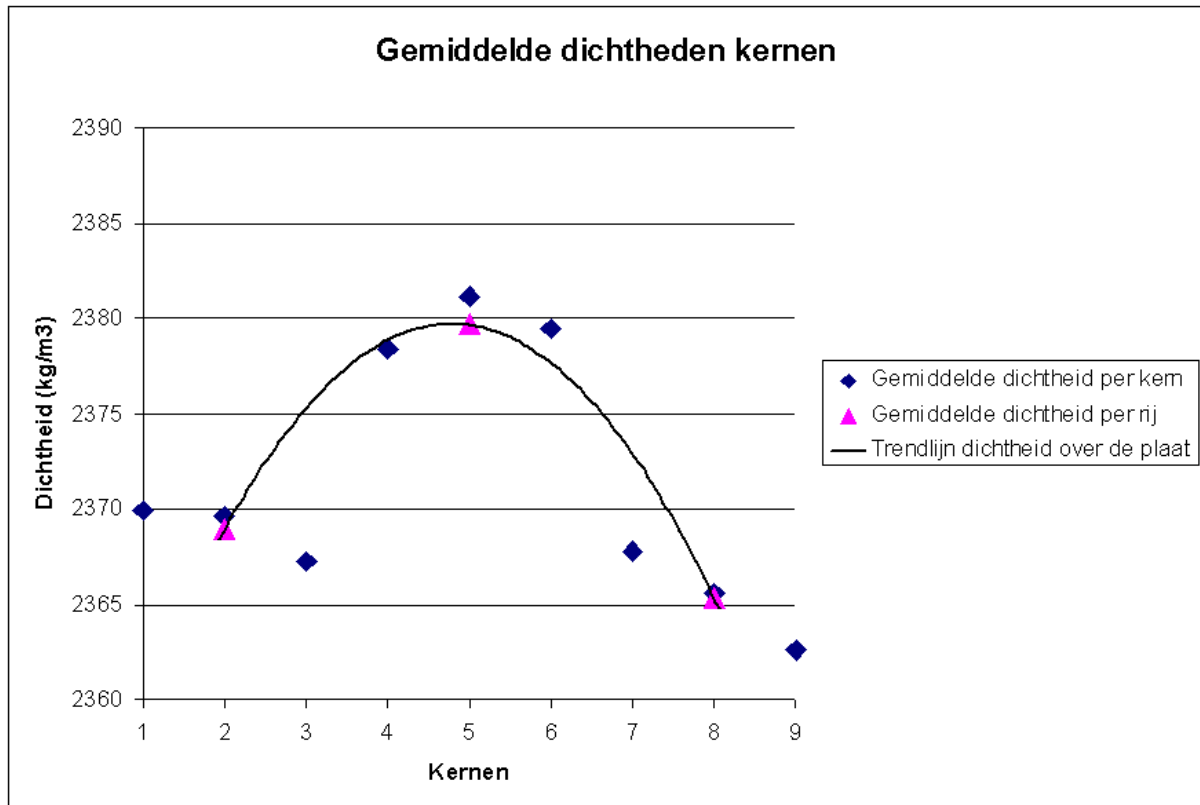
Figuur 4.17: Verdichtingsenergie per verdichtingstemperatuur positie gestuurde verdichting

2.2.1.3 Dichtheid

De proefstukken zijn getoetst (=meten, vergelijken met de norm en het trekken van een conclusie) op hun afmetingen (diameter en hoogte) en de dichtheid. Hieruit kan geconcludeerd worden dat alle proefstukken voldoen aan de eisen van de afmetingen; hoogte en diameter. Voor wat betreft de dichtheid is duidelijk dat vijf kernen van plaat 8 (verdichtingstemperatuur van 102 °C) een te lage dichtheid hebben (ongeveer 5 kg/m³ te laag) en dat vijf kernen van plaat 9 (verdichtingstemperatuur van 140 °C) een te hoge dichtheid hebben (ongeveer 6 kg/m³ te hoog). Daarnaast valt op dat de platen 10, 11 en 12, verdicht bij een temperatuur van 80-90 °C, structureel een te hoge dichtheid hebben van gemiddeld 2395 kg/m³. Een mogelijke verklaring hiervoor is de stijve onderlaag en de goede opsluiting in de Freundl plaatverdichter.

Om het causale verband tussen de verdichtingstemperatuur en de mechanische eigenschappen te bepalen is het van belang om zoveel mogelijk andere variabelen gelijk te houden. Daarom zijn achtereenvolgens de verdeling van de dichtheid over de plaat en het effect van het slijpen per vergeleken.

In figuur 4.18 zijn de gemiddelde dichtheden van de kernen over de plaat weergegeven (de nummers van de kernen komen overeen met de nummers uit figuur 4.6). De kernen zijn genummerd over de walsrichting van links naar en van boven naar beneden. Hierbij valt op dat de kernen in het midden van de plaat (kernen 4, 5, en 6) een hogere dichtheid (10-15 kg/m³) hebben dan de kernen aan de voor- en achterkant van de plaat (bezien vanuit de walsrichting). Omdat de dichtheden van de kernen over de platen ongeveer een zelfde structuur vertonen is ervoor gekozen om standaard op de kernen 3, 5 en 7 een triaxiaalproef te doen en op de kernen 1, 2, 4, 6, 8 en 9 slijtproeven te doen. Op deze manier worden op elke hoogte en breedte van de plaat beide soorten mechanische proeven uitgevoerd en is de verdeling qua dichtheid over de platen gelijkwaardig.

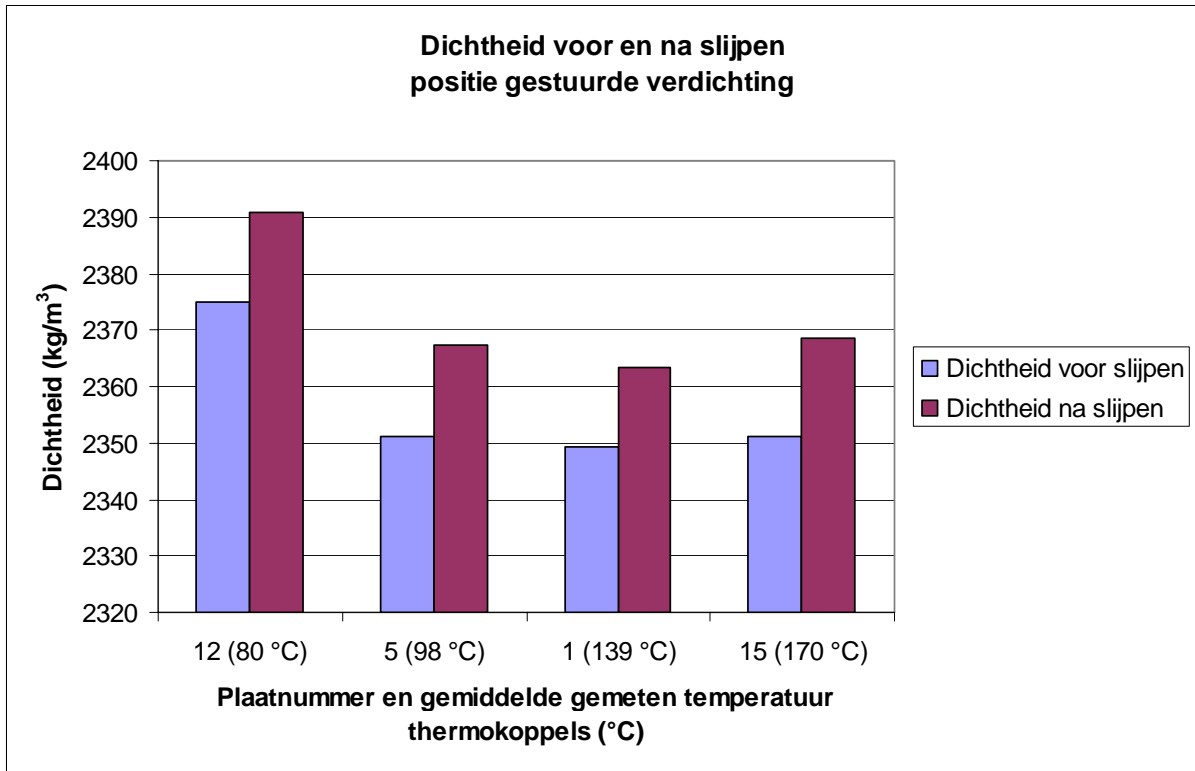


Figuur 4.18: Verdeling dichtheden van de kernen over de plaat positie gestuurde verdichting

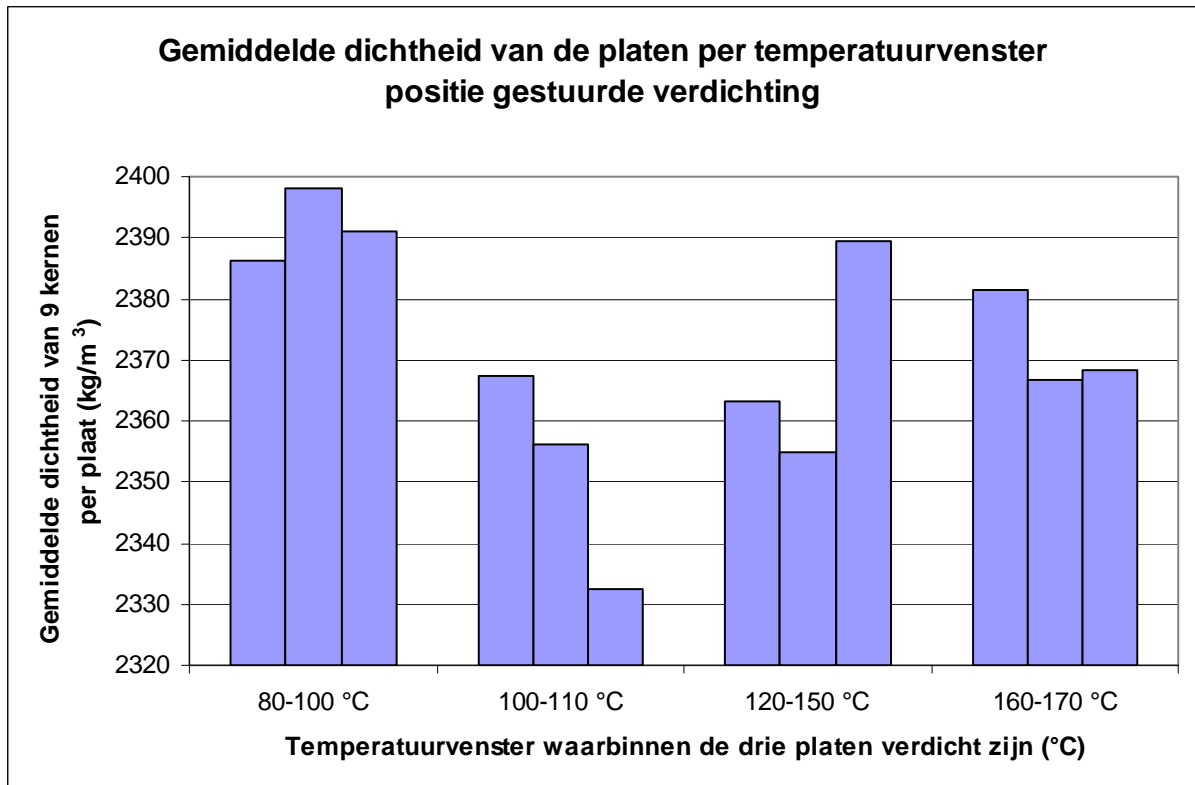
Vervolgens is het effect van het slijpen op de dichtheid onderzocht. Per ‘temperatuurbatch’ is er één plaat geanalyseerd met betrekking tot het slijpen. De gemiddelde dichtheden van de kernen voor en na het slijpen zijn weergegeven in figuur 4.19. Hierbij valt op dat de gemiddelde dichtheidsverbetering varieert van 14 tot 17 kg/m³ en relatief is dit een variatie van 0,59% tot 0,74%. Het effect van het slijpen op de dichtheid van de kernen is dus vrijwel gelijk voor de verschillende verdichtingstemperaturen en dus heeft het slijpen van de kernen geen verschillend effect per verdichtingstemperatuur.

Omdat de dichtheden per plaat gelijk verdeeld zijn en het slijpen geen verschillend effect heeft per verdichtingstemperatuur kunnen de dichtheden per verdichtingstemperatuur onderling worden vergeleken.

In figuur 4.20 zijn de gemiddelde dichtheden van de platen per temperatuurvenster weergegeven. Het temperatuurvenster dat in deze figuur is weergegeven is gebaseerd op de temperaturen geanalyseerd in paragraaf 4.1.2.1. Hierbij valt op dat de dichtheden in het temperatuurvenster 80-100 °C hoger liggen dan de dichtheden van de andere verdichtingstemperaturen, ongeveer 30 kg/m³ en dat is ongeveer 1,3%. Dit is opvallend, omdat de temperatuur van het mengsel lager is en dus minder viskeus. Een mogelijke verklaring hiervoor is de grote kracht, die in de praktijk bijna niet mogelijk is, die op het mengsel uitgeoefend wordt. In de praktijk kan een normale wals waarschijnlijk het mengsel niet meer verder verdichten met de kracht die de wals uit kan oefenen. Verder verschillen de dichtheden van de overige temperatuurvensters niet significant.



Figuur 4.19: Dichtheid voor en na slijpen positie gestuurde verdichting



Figuur 4.20: Dichtheden per verdichtingvenster positie gestuurde verdichting

2.2.1.4 Mechanische eigenschappen

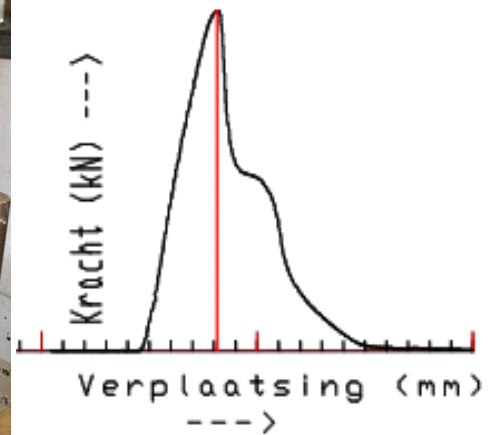
Om de mechanische eigenschappen met betrekking tot spoorvorming en scheurvorming te bepalen zijn zoals aangegeven slijt- en triaxiaalproeven uitgevoerd. De resultaten hiervan worden achtereenvolgens besproken.

Slijtproef

Om de weerstand tegen scheurvorming te bepalen zijn slijtproeven uitgevoerd, waarbij een tweetal aspecten zijn vergeleken; de slijtsterkte (oftewel de indirecte treksterkte) en de scheurtaaiheid. Achtereenvolgens worden de resultaten van de slijtproeven besproken.

N.B. Per plaat zijn een zestal slijtproeven uitgevoerd. De resultaten van deze zes kernen per plaat zijn gemiddeld, omdat de kernen redelijk gelijke resultaten opleverden.

Bij een aantal kernen is de slijtproef min of meer mislukt, omdat de kern meer afschoof dan dat het spleet, oftewel de kern is al gespleten, maar blijft nog hangen tussen het hulpstuk van de testbank. Dit is geïllustreerd met een foto en het resultaat in figuur 4.21. Deze resultaten zijn niet meegenomen in de analyse.



Figuur 4.21: Correctie slijtproef

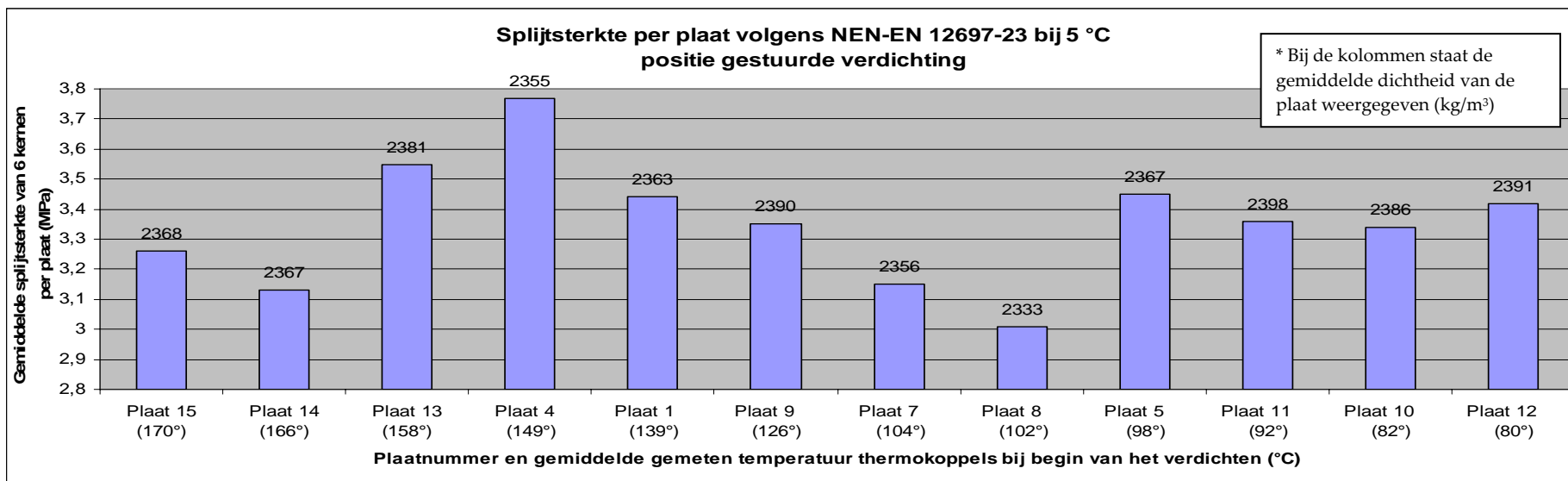
N.B.(2). In de figuren zijn door middel van labels de gemiddelde dichtheid per plaat weergegeven.

In figuur 4.22 is de gemiddelde slijtsterkte per plaat absoluut weergegeven en in figuur 4.23 is de relatieve slijtsterkte per plaat weergegeven. Hierbij lijkt er een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua slijtsterkte tussen de 149 °C en 158 °C. De slijtsterkte van 98 °C tot 80 °C hebben weer een hogere slijtsterkte. Een mogelijke verklaring is de hoge dichtheid die deze proefstukken hebben gehaald. De hoge verdichtingstemperaturen (166 °C en 170 °C) en de gemiddelde verdichtingstemperaturen (104 °C en 102 °C) hebben ongeveer 10% (ongeveer 0,3 MPa) minder slijtsterkte hebben dan de overige verdichtingstemperaturen.

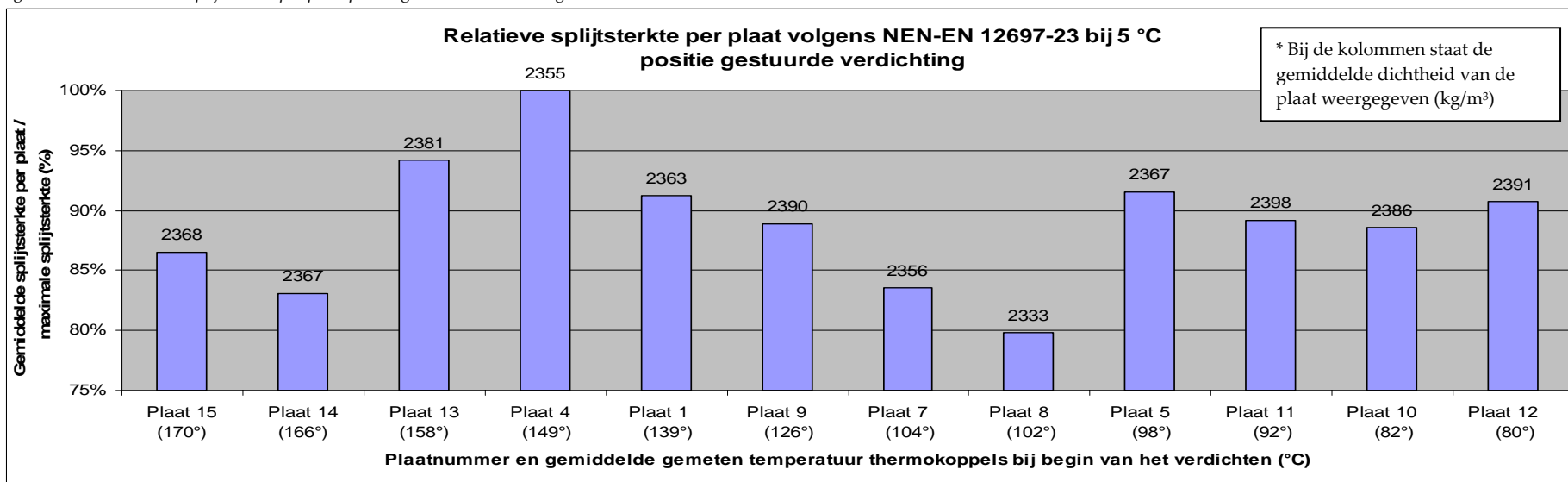
Verder lijkt er wel een relatie te bestaan tussen de dichtheid en slijtsterkte per plaat, met uitzondering van plaat 4. Platen met een lage dichtheid (in de range van 2333 tot 2368 kg/m³) hebben gemiddeld een lagere slijtsterkte van 0,2 MPa (ongeveer 5%) dan platen met een hoge dichtheid (in de range van 2381 tot 2398 kg/m³).

In figuur 4.24 is de scheurtaaiheid per plaat absoluut weergegeven en in figuur 4.25 is de relatieve scheurtaaiheid weergegeven. De gemeten temperaturen zijn gebundeld in tijdsvensters en weergegeven op de X-as. Er lijkt wel een duidelijk verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht in het temperatuurvenster 140 °C tot 150 °C hebben duidelijk een hogere scheurtaaiheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Gemiddeld is de scheurtaaiheid in het temperatuurvenster 140 °C tot 150 °C, 1,8 N.mm/mm² hoger dan bij de overige verdichtingstemperaturen en dat betekent een afname van ongeveer 25% scheurtaaiheid ten opzichte van de overige verdichtingvensters.

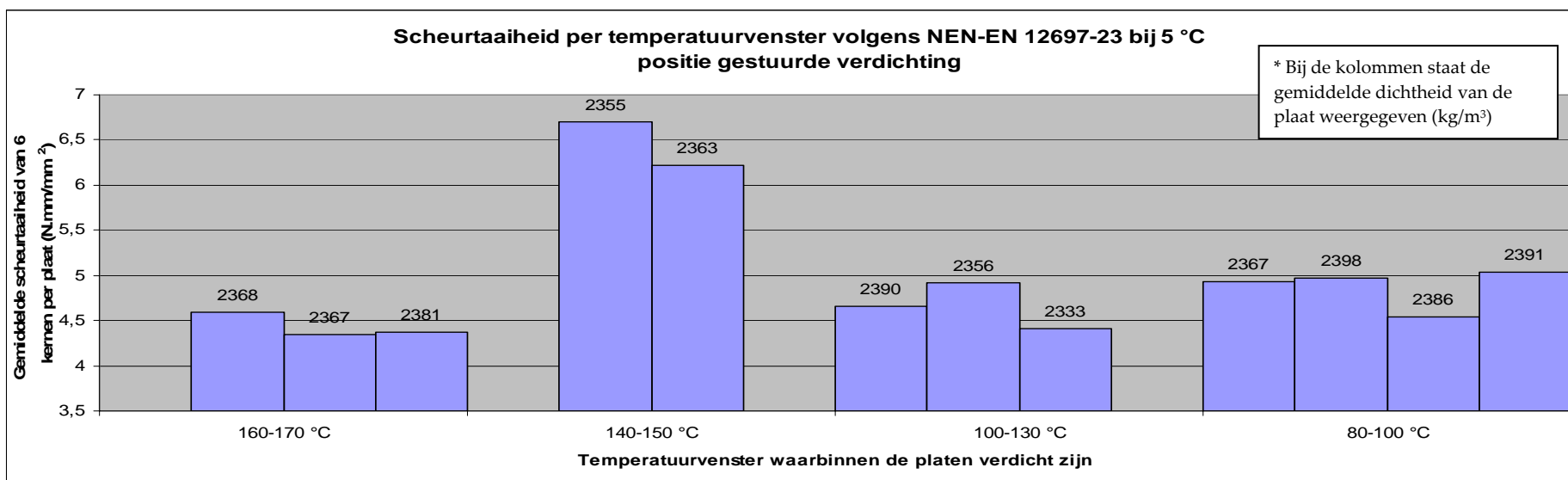
Er is geen verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en dichtheid. Platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid. Hieruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid.



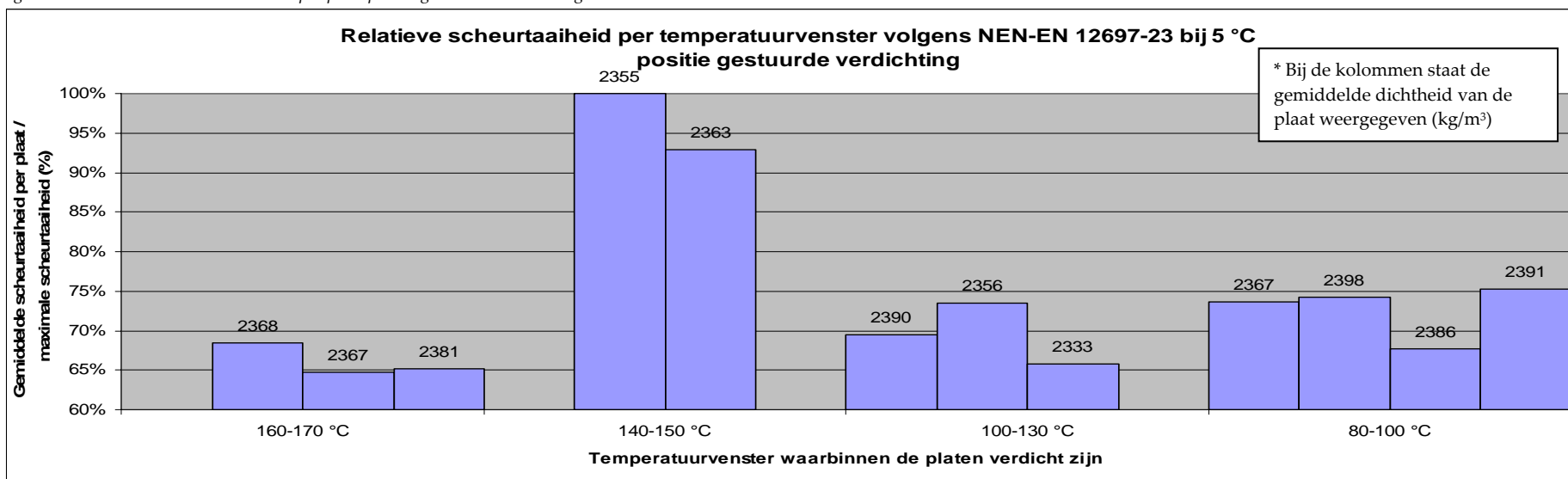
Figuur 4.22: Gemiddelde splijsterkte per plaat positie gestuurde verdichting



Figuur 4.23: Relatieve splijsterkte per plaat positie gestuurde verdichting

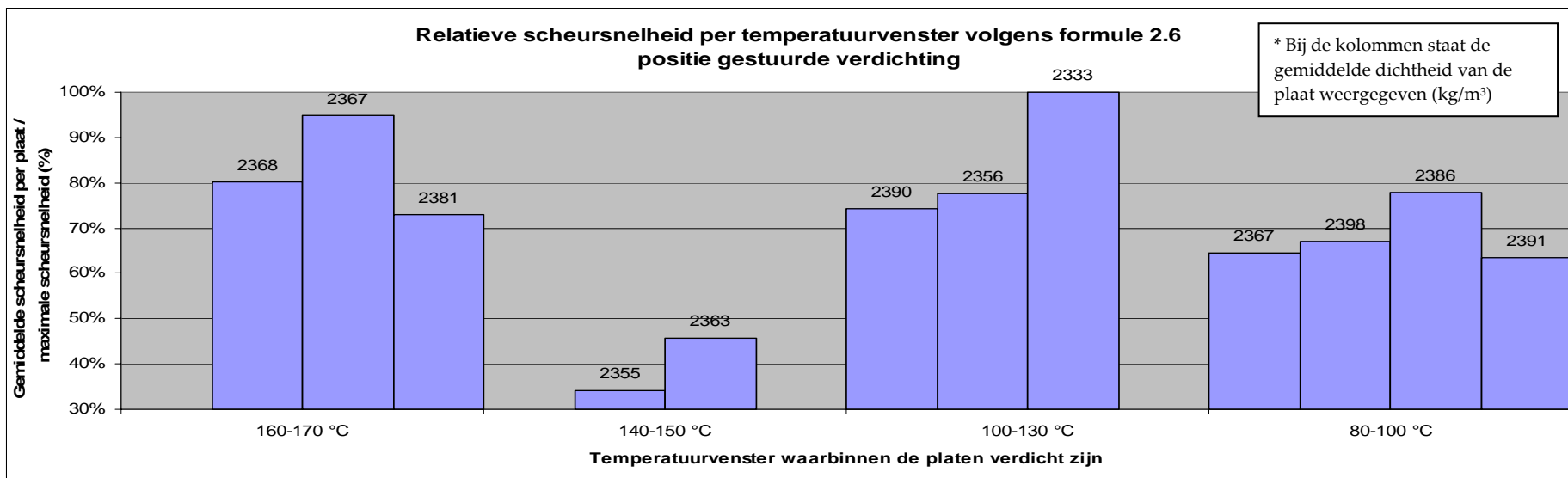


Figuur 4.24: Gemiddelde scheurtaaiheid per plaat positie gestuurde verdichting



Figuur 4.25: Relatieve scheurtaaiheid per plaat positie gestuurde verdichting

Vervolgens is de relatieve scheursnelheid per plaat (en verdichtingstemperatuur) weergegeven in figuur 4.26, waarbij op de X-as wederom de gekozen temperatuurvenster zijn weergegeven. Wederom lijkt er een relatie aanwezig met de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht in het temperatuurvenster 140 °C tot 150 °C hebben duidelijk een lagere scheursnelheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Relatief is de scheursnelheid in het temperatuurvenster 140 °C tot 150 °C, 40% lager dan de scheursnelheid bij de overige verdichtingvensters en dus is de verdichtingstemperatuur ook een belangrijke parameter voor de scheursnelheid.



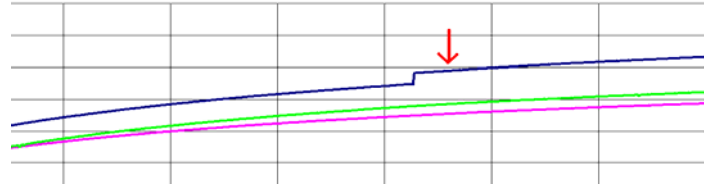
Figuur 4.26: Relatieve scheursnelheid per plaat positie gestuurde verdichting

Triaxiaalproef

Om de weerstand tegen spoorvorming te bepalen zijn triaxiaalproeven in de NAT (Nottingham asphalt tester) uitgevoerd, waarbij de cumulatieve rek na 10.000 lastherhalingen is vergeleken. Achtereenvolgens worden de resultaten van de triaxiaalproeven besproken.

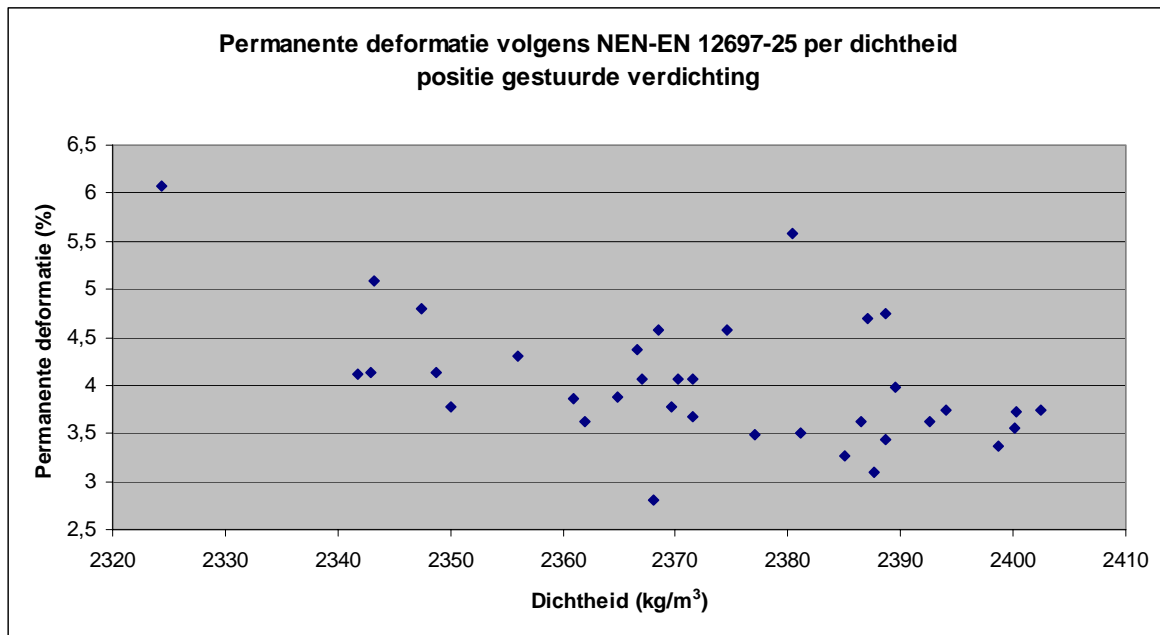
Kruip STAB 0/16 40 °C (plaat 3)

N.B. Bij een aantal kernen zijn er waarden gecorrigeerd, omdat de LVDT's (verplaatsingssensoren) soms een rare waarde registreren. Dit is weergegeven in figuur 4.27.



Figuur 4.27: Correctie triaxiaalproef

In figuur 4.28 is de permanente deformatie uitgezet tegenover de dichtheid voor alle kernen. Hierin is geen heldere relatie tussen de dichtheid en de permanente deformatie te zien. Binnen een range van dichtheden van 2340 kg/m³ tot 2400 kg/m³ is een de permanente deformatie van 3% tot 5% te zien. Binnen deze range van dichtheden is dus geen significant verschil in permanente deformatie gevonden.

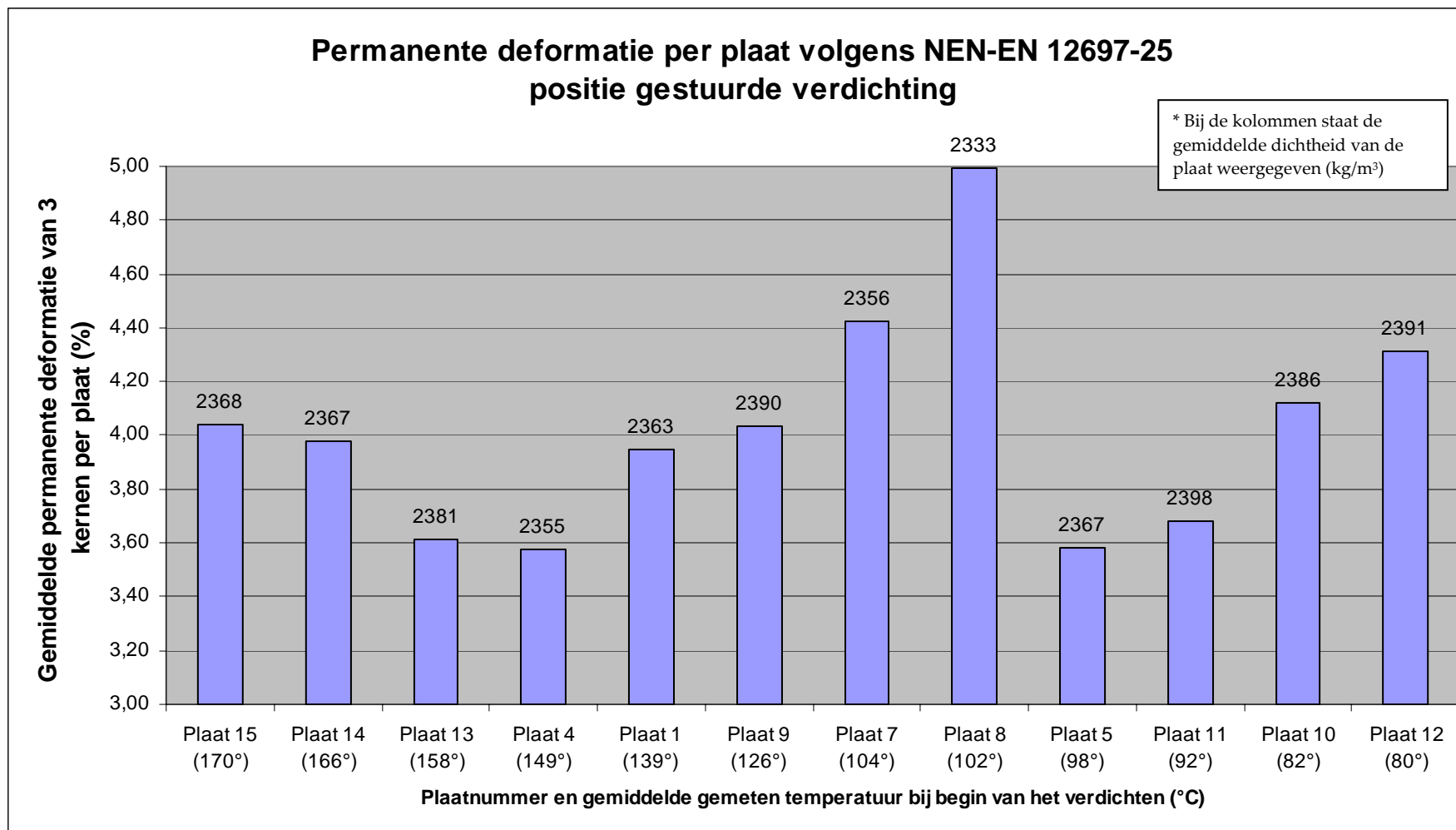


Figuur 4.28: Permanente deformatie per dichtheid positie gestuurde verdichting

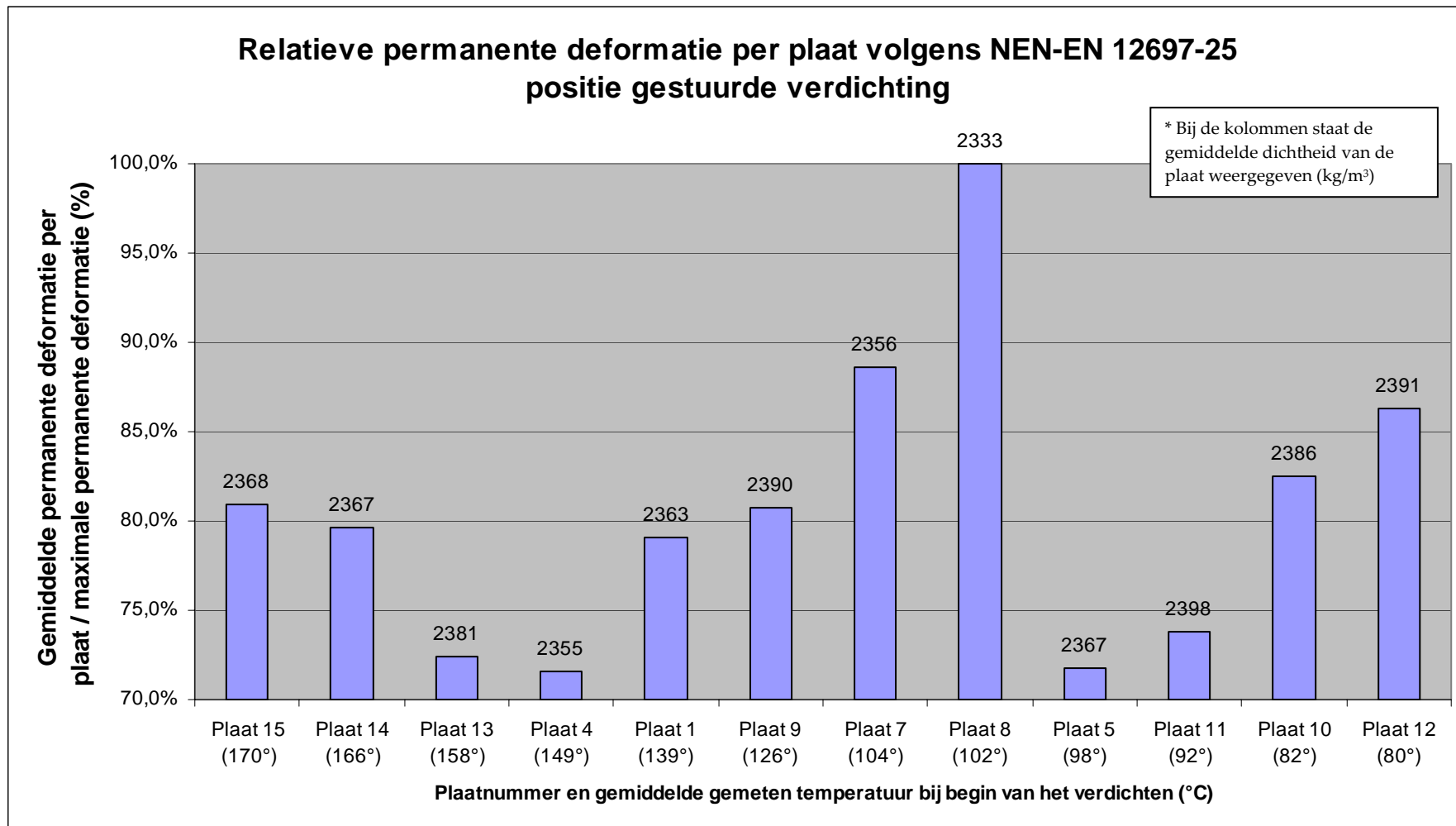
In figuur 4.29 is de gemiddelde permanente deformatie per plaat (en dus per verdichtingstemperatuur) absoluut weergegeven en in figuur 4.30 is de relatieve gemiddelde permanente deformatie per plaat weergegeven. Hierbij zijn op de X-as de gemiddelde gemeten temperaturen met de thermokoppels weergegeven. De labels in de figuren geven de gemiddelde dichtheid per plaat over de 9 geboorde kernen weer.

Uit de figuur blijkt dat er bij verdichtingstemperaturen van 158-149 °C en 98-92 °C relatief weinig permanente deformatie is ten opzichte van de overige onderzochte verdichtingstemperaturen. Bij de overige verdichtingstemperaturen vindt gemiddeld 0,5% meer permanente deformatie plaats, relatief is dat ongeveer 10%. Wel moet opgemerkt worden dat de standaardafwijking per plaat (dus over de drie kernen per plaat) gemiddeld 0,4% is, variërend van 0,1% tot 0,7%.

Dat er weinig permanente deformatie plaatsvindt bij de verdichtingstemperaturen van 98-92 °C is opvallend. De oorzaak hiervan is onduidelijk; mogelijke verklaringen zouden kunnen zijn dat er verbrijzeling optreedt, de korreloriëntatie anders is, of een hogere stijfheid is behaald.

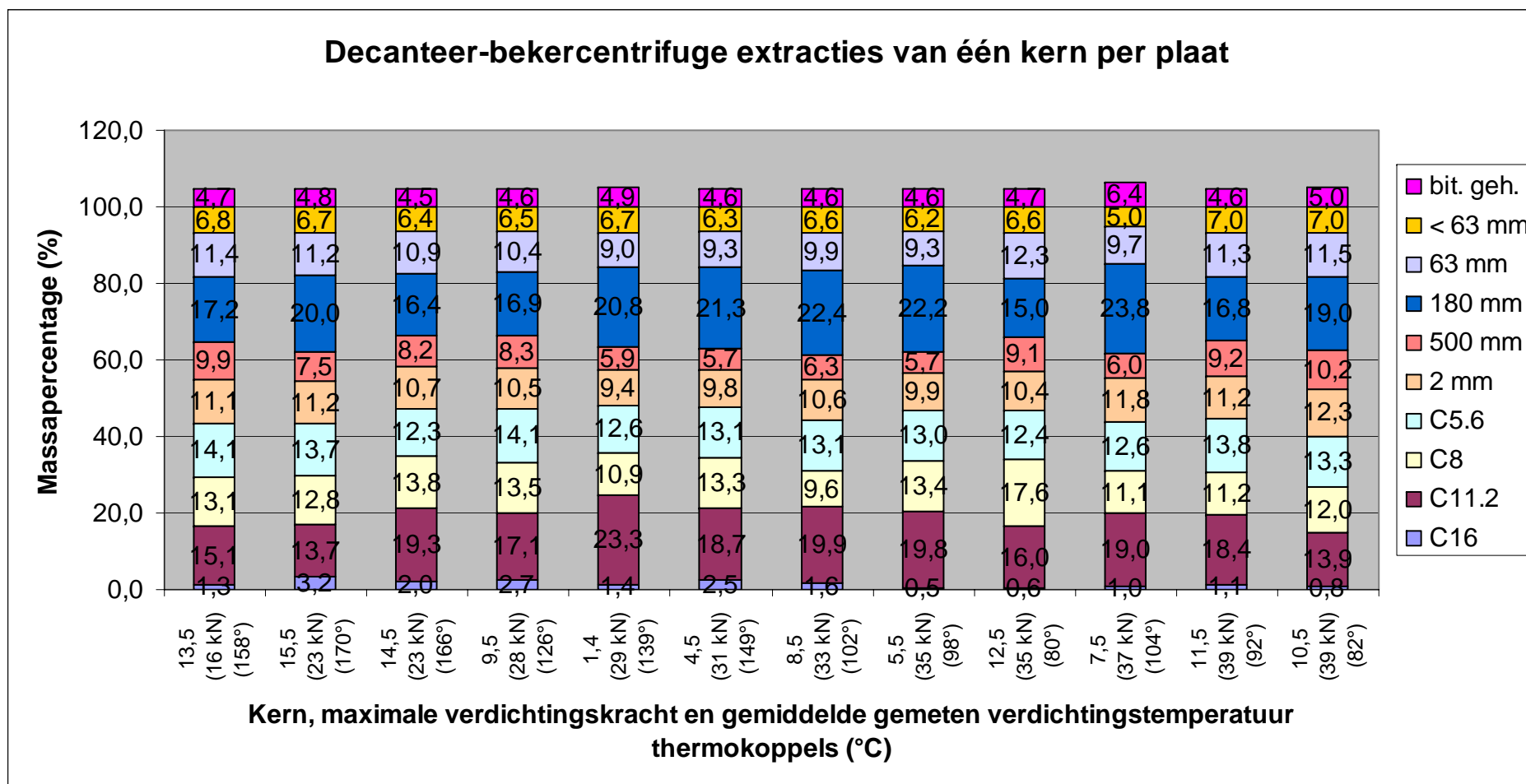


Figuur 4.29: Permanente deformatie per plaat en per temperatuur positie gestuurde verdichting



Figuur 4.30: Relatieve permanente deformatie per plaat en per temperatuur positie gestuurde verdichting

Om te bepalen of er verbrijzeling is opgetreden zijn er extracties op de geslepen kernen uitgevoerd. Nadeel hiervan is dat de bovenste en onderste centimeter van het proefstuk eraf geslepen zijn; de plaatsen waar de meeste verbrijzeling te verwachten is, maar het verdichten van nieuwe platen om te bepalen of er verbrijzeling optreedt is om tijdsredenen niet haalbaar geweest. De resultaten van de extracties zijn weergegeven in figuur 4.31. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen verbrijzeling in de tweede tot en met de zevende centimeter heeft plaatsgevonden.



Figuur 4.31: Extracties kernen positie gestuurde verdichting

2.2.1.5 Conclusies positie gestuurde verdichting

Bij de positie gestuurde verdichting zijn er asfaltplaten verdicht met de Freundl plaatverdichter gestuurd op 80 mm laagdikte bij verschillende verdichtingstemperaturen variërend van 80 °C tot 170 °C. Het maximale temperatuurverschil in de asfaltplaten is 14 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 9 °C, hetgeen duidt op een redelijk homogene temperatuur binnen de asfaltplaat. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de temperaturen aan de zijkant van de asfaltplaat gemeten zijn, waarvan verwacht wordt dat daar de grootste temperatuurverschillen optreden, dus zijn de gemeten verschillen zeer waarschijnlijk ook echt de maximale verschillen.

De resultaten van de positie gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter zijn geanalyseerd op het aantal walsovergangen, de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de totale verdichtingsenergie.

Voor wat betreft het aantal walsovergangen geldt dat er geen tot weinig verschil zit in het aantal walsovergangen dat nodig is om tot een laagdikte van 80 mm te verdichten. De norm (EN 12697-33) geeft aan dat het goed is om met 10 tot 50 walsovergangen te verdichten (per fase) en de resultaten van alle verdichtingstemperaturen voldoen aan deze norm.

Voor wat betreft de maximale verdichtingskracht valt te concluderen dat er meer kracht nodig is wanneer de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen meer viskeus zijn en er dus meer kracht nodig is om te verdichten. Krachten in de Freundl plaatverdichter die boven de 30 kN liggen zijn in de praktijk vrijwel ondenkbaar, omdat er dan zo'n zware wals nodig is die in de praktijk niet verkrijgbaar is. Dit is het geval bij verdichtingstemperaturen lager dan 104 °C. Bij verdichtingstemperaturen hoger dan 149 °C is er maar weinig kracht nodig om het asfaltmengsel te verdichten. Bij deze temperaturen zal er dus met een lichtere wals verdicht moeten worden (ongeveer 6000 kg), anders wordt het bitumen door het steenskelet naar boven gedrukt en zal het mengsel vet slaan. Vet slaan van het asfalt is het principe dat slappe mortel samen met de lucht het mengsel uitgedreven wordt i.p.v. dat de mortel aan het aggregaat hecht (Van Stek en Linden, 1992).

Bij de cumulatieve verdichtingskracht is, evenals bij de maximale kracht die nodig is om te verdichten, te zien dat de cumulatieve kracht toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische reden hiervoor lijkt dezelfde als bij de maximale kracht, de bitumen zijn minder viskeus en daarmee makkelijker verwerkbaar.

Uit de analyse van de verdichtingsenergie (in kN) blijkt ook dat de verdichtingsenergie toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Wederom lijkt de meest logische reden hiervoor dat de bitumen minder viskeus zijn en daarmee makkelijker verwerkbaar.

Vervolgens zijn uit de asfaltplaten negen kernen per plaat geboord en geslepen, waarbij de dichtheden van de asfaltplaten zijn geanalyseerd.

Het effect van het slijpen op de dichtheid van de kernen is bij alle platen vrijwel gelijk (een dichtheidsverbetering van 14-17 kg/m³) en dus heeft het slijpen van de kernen geen verschillend effect per verdichtingstemperatuur.

Vervolgens is de verdeling van de dichtheid over de asfaltplaat geanalyseerd, waarbij geconcludeerd wordt dat structureel de kernen in het midden van de plaat een hogere dichtheid hebben dan de kernen aan de voor- en achterkant van de plaat (bezien vanuit de walsrichting).

Daarna zijn de gemiddelde dichtheden van de platen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd. Hierbij valt op dat de dichtheden bij een verdichtingstemperatuur rond de 80 °C een stuk hoger liggen dan de dichtheden van de andere verdichtingstemperaturen. Dit is opvallend, omdat de temperatuur van het mengsel lager is en dus minder viskeus. De oorzaak hiervan is onduidelijk; wellicht treedt er verbrijzeling op, is de korreloriëntatie anders, wordt er een hogere stijfheid gehaald, etc. Een mogelijke verklaring hiervoor is de grote kracht, die in de praktijk bijna niet mogelijk is, die op het mengsel uitgeoefend wordt. In de praktijk kan een normale wals waarschijnlijk het mengsel niet meer verder verdichten met de kracht die de wals uit kan oefenen. Om te bepalen of er verbrijzeling is opgetreden

zijn er extracties op de geslepen kernen uitgevoerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen verbrijzeling in de tweede tot en met de zevende centimeter heeft plaatsgevonden (de eerste en achtste centimeter zijn er afgeslepen, dus daar is niets van bekend). Verder verschillen de dichtheden van de overige temperatuurvensters niet significant.

Na het analyseren van de dichtheden zijn de mechanische eigenschappen van de kernen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd op basis van de splijtsterkte, de scheurtaaiheid, de relatieve scheursnelheid en de permanente deformatie. Tussen de verdichtingstemperatuur en de splijtsterkte lijkt er een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua slijpsterkte tussen de 149 °C en 158 °C. De splijtsterkte van 98 °C tot 80 °C hebben weer een hogere splijtsterkte. Een mogelijke verklaring is de hoge dichtheid die deze proefstukken hebben gehaald. De hoge verdichtingstemperaturen (166 °C en 170 °C) en de gemiddelde verdichtingstemperaturen (104 °C en 102 °C) hebben ongeveer 10% (ongeveer 0,3 MPa) minder splijtsterkte hebben dan de overige verdichtingstemperaturen. Ook lijkt er een relatie tussen de dichtheid en de splijtsterkte; platen met een lage dichtheid (in de range van 2333 tot 2368 kg/m³) hebben gemiddeld een lagere splijtsterkte van 0,1 MPa dan platen met een hoge dichtheid (in de range van 2381 tot 2398 kg/m³).

Tussen de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur lijkt wel een verband zichtbaar; de platen verdicht bij een temperatuur van 149 °C en 139 °C hebben duidelijk een hogere scheurtaaiheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Dit bevestigt het onderzoek van Recansens et al (2000) die concluderen dat de indirecte treksterkte (splijtsterkte), en dus de scheurtaaiheid, of de verdichtingstemperatuur efficiëntere parameters zijn om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

Vervolgens lijkt er een relatie aanwezig tussen de scheursnelheid en de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht bij een temperatuur van 149 °C en 139 °C hebben duidelijk een lagere scheursnelheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Relatief is de scheursnelheid bij de verdichtingstemperaturen 139 °C en 149 °C, 40% lager dan de scheursnelheid bij de overige verdichtingstemperaturen en dus is de verdichtingstemperatuur ook een belangrijke parameter voor de scheursnelheid.

Voor wat betreft de permanente deformatie blijkt dat bij verdichtingstemperaturen van 158-149 °C en 98-92 °C relatief weinig permanente deformatie is ten opzichte van de overige onderzochte verdichtingstemperaturen. Bij de overige verdichtingstemperaturen vindt gemiddeld 0,5% meer permanente deformatie plaats. Wel moet opgemerkt worden dat de standaardafwijking per plaat (dus over de drie kernen per plaat) gemiddeld 0,4% is, variërend van 0,1% tot 0,7%.

Dat er weinig permanente deformatie plaatsvindt bij de verdichtingstemperaturen van 98-92 °C is opvallend. De oorzaak hiervan is onduidelijk; wellicht treedt er verbrijzeling op, is de korreloriëntatie anders, wordt er een hogere stijfheid gehaald, etc. Zoals eerder aangegeven kan uit extracties geconcludeerd worden dat er geen verbrijzeling in de tweede tot en met de zevende centimeter heeft plaatsgevonden.

Mollenhauer (2009) heeft ook onderzoek gedaan naar het effect van de verdichtingstemperatuur op de weerstand tegen permanente deformatie met de positie gestuurde verdichting. Hieruit wordt geconcludeerd dat binnen een range van 120-150 °C een lagere verdichtingstemperatuur leidt tot een hogere weerstand tegen permanente deformatie. Dit is in tegenstelling tot de resultaten uit dit onderzoek, waarbij binnen deze temperatuurrange een lagere verdichtingstemperatuur leidt tot een lagere weerstand tegen permanente deformatie. Een verklaring voor dit verschil is niet gevonden, maar wel moet opgemerkt worden dat de resultaten bij beide onderzoeken redelijk veel variatie vertonen.

Uiteindelijk is de spreiding van de belangrijkste variabelen (dichtheid, temperatuur en de bitumen) geanalyseerd. Deze analyse is weergegeven in bijlage 2.4 (deel 2). Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de dichtheid niet meer dan 10 kg/m³ verschilt ten opzichte van de gemiddelde dichtheid binnen een plaat en dat in 90% van de gevallen de temperatuur niet meer dan 10 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde temperatuur binnen de plaat. Verder is het doel dat in 90% van

de gevallen de penetratie niet meer dan 4,0 dmm verschilt ten opzichte van de gemiddelde penetratie van het monster en de ring&kogel niet meer dan 1,0 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde ring&kogel van het monster. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de spreiding van de variabelen binnen deze doelen vallen.

Resumé: Uit de resultaten van de positie gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter blijkt dat de beoogde dichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen gehaald kan worden, maar dat er wel een groot verschil tussen de scheurtaaiheid en scheursnelheid bij verschillende verdichtingstemperaturen bestaat. De verdichtingstemperatuur, de scheurtaaiheid en scheursnelheid lijken op basis van de positie gestuurde verdichting efficiëntere parameters om het asfalt(mengsel) te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

2.2.2 Kracht gestuurde verdichting

In deze paragraaf zijn de resultaten van de kracht gestuurde verdichting weergegeven. Om tijdsredenen is ervoor gekozen om minder asfaltplaten per verdichtingstemperatuur te onderzoeken, namelijk twee platen per verdichtingstemperatuur in plaats van drie platen per verdichtingstemperatuur.

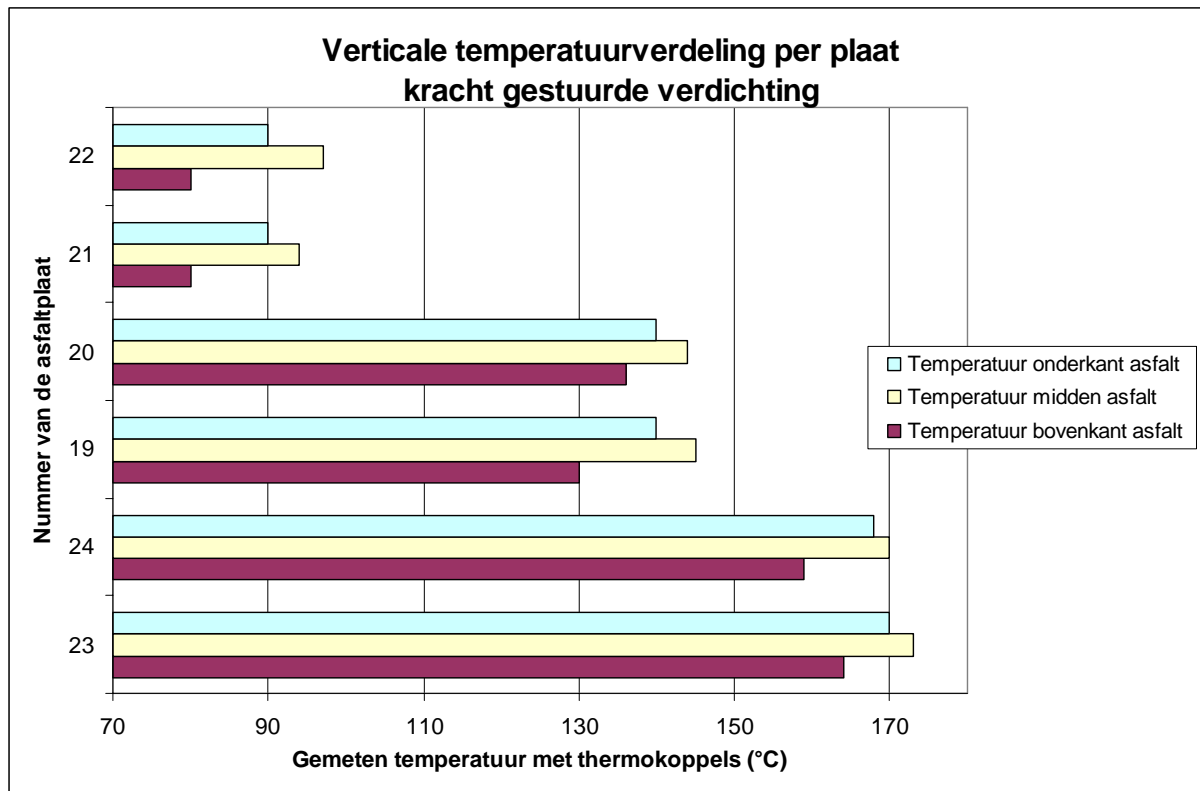
2.2.2.1 Temperatuur

In deze paragraaf worden de resultaten van de metingen met de thermokoppels van de kracht gestuurde verdichting besproken. De drie aspecten; de homogeniteit van de temperatuur van het asfaltmengsel in de verticale richting van het asfaltmengsel tijdens verdichting, de afkoeling tijdens de verdichting en de tijd waarin het asfaltmengsel afkoelt van 130 °C tot 30 °C, worden wederom achtereenvolgens beschouwd.

De temperatuur van de onderkant, het midden en de bovenkant van de verschillende asfaltplaten zijn weergegeven in figuur 4.32. De gemiddelde temperaturen van de platen variëren van 88 °C tot 169 °C. Het maximale gemeten temperatuurverschil binnen een asfaltplaat is 17 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 12 °C. De standaardafwijking ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van het asfalt is gemiddeld over alle platen 6 °C variërend van 4 tot 9 °C.

Het gemiddelde aantal walsovergangen met de Freundl plaatverdichter bij de kracht gestuurde verdichting is 58 enkele walsovergangen met een tijdsduur van 2,3 seconden dus gemiddeld duurt de verdichting met Freundl plaatverdichter ongeveer 2,5 minuut. Tijdens deze verdichting koelt het asfaltmengsel gemiddeld over alle platen 3 °C af, dus de afkoeling van het asfaltmengsel tijdens de verdichting is nihil te noemen.

De tijd die het asfaltmengsel nodig heeft om van ongeveer 130 °C naar 30 °C af te koelen varieert van 220 tot 310 minuten en gemiddeld is dit 265 minuten met een standaardafwijking van 39 minuten. Deze grote variatie is een gevolg van het moment wanneer de plaat in de koeling is gezet en het verschil in temperatuur bij verdichten; een onverdicht asfaltmengsel koelt namelijk sneller af dan verdicht asfalt.



Figuur 4.32: Temperatuur in de bovenkant, het midden en de onderkant van de verschillende asfaltplaten kracht gestuurde verdichting

2.2.2.2 Verdichting

Achtereenvolgens worden de verdichtingsresultaten van de kracht gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter weergegeven. Zoals aangegeven is er verdicht in twee fasen, zodat in de eerste fase een korrelrangschikking plaatsvindt, waarbij de stenen langs elkaar moeten kunnen glijden (positie-gestuurd) en in de tweede fase vindt de werkelijke verdichting plaats, waarbij door het toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt (kracht-gestuurd).

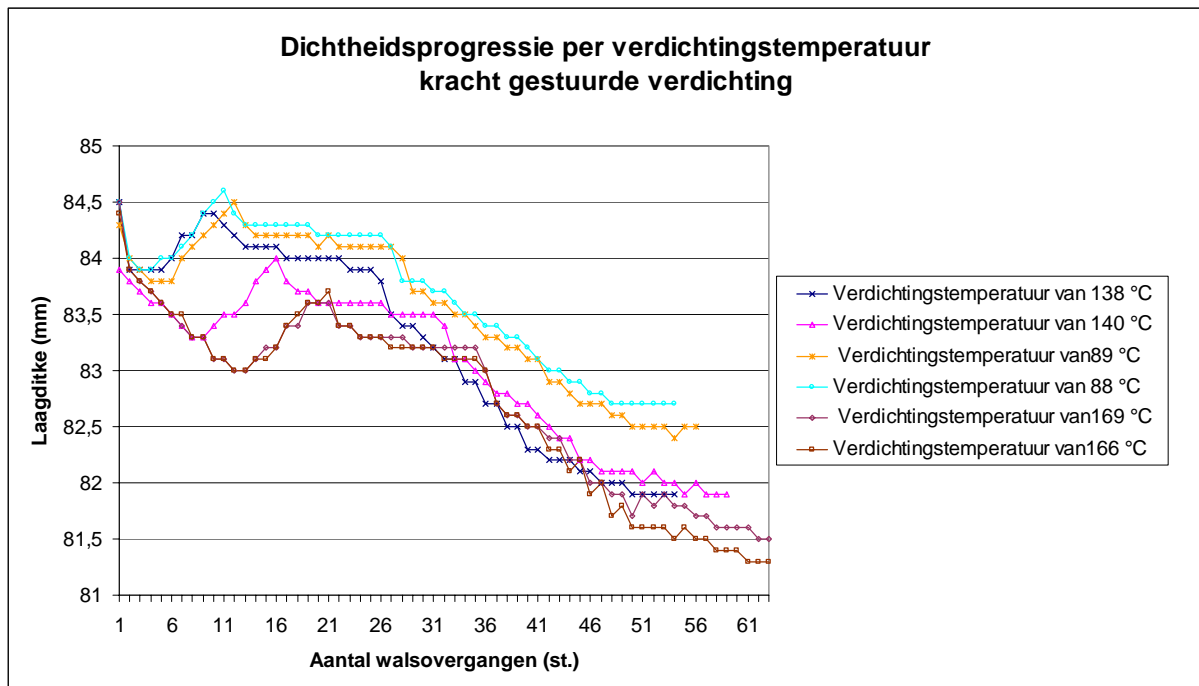
Zoals beschreven in de analyselijn (paragraaf 2.5) zijn de vergelijkingscriteria voor de resultaten van de Freundl plaatverdichter het aantal walsovergangen, de maximale belasting, de verdichtingsprogressie, de cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie (figuur 4.1). Bij de kracht-gestuurde verdichting wordt het aantal walsovergangen en de verdichtingskracht gestuurd (en dus ook de cumulatieve kracht) en dus vormen de verdichtingsprogressie en de verdichtingsenergie de vergelijkingscriteria.

In figuur 4.33 is de verdichtingsprogressie per verdichtingstemperatuur weergegeven. Hierbij zijn een tweetal aspecten van belang; het terugveereffect tijdens verdichten en de eindlaagdikte.

Bij de verdichtingsprogressie van de kracht-gestuurde verdichting valt op dat de laagdikte in het begin afneemt, vervolgens weer toeneemt, waarna vervolgens de laagdikte redelijk constant afneemt. Het moment waarop dit terugveereffect tijdens verdichting plaatsvindt varieert per verdichtingstemperatuur; bij de hogere verdichtingstemperaturen vindt dit effect plaats na ongeveer 13 walsovergangen en bij de lagere verdichtingstemperaturen vindt dit effect plaats na ongeveer 4 walsovergangen. Waarschijnlijk ligt de oorzaak hiervan bij manier van meten van de laagdikte door de Freundl plaatverdichter, omdat de Freundl plaatverdichter moet zoeken naar de juiste hoogte om te beginnen met verdichten, waarbij het walssegment bij de hogere verdichtingstemperaturen meer wegzakt in het asfaltmengsel en daardoor langer moet zoeken naar de juiste beginhoogte.

Het tweede opvallende aspect in de figuur is de eindlaagdikte die de Freundl plaatverdichter meet per verdichtingstemperatuur. De lagere verdichtingstemperaturen bereiken een eindlaagdikte van gemiddeld 82,6 mm, de gemiddelde verdichtingstemperaturen een eindlaagdikte van 81,9 mm en de hogere verdichtingstemperaturen bereiken een gemiddelde eindlaagdikte van 81,4 mm. Hieruit kan

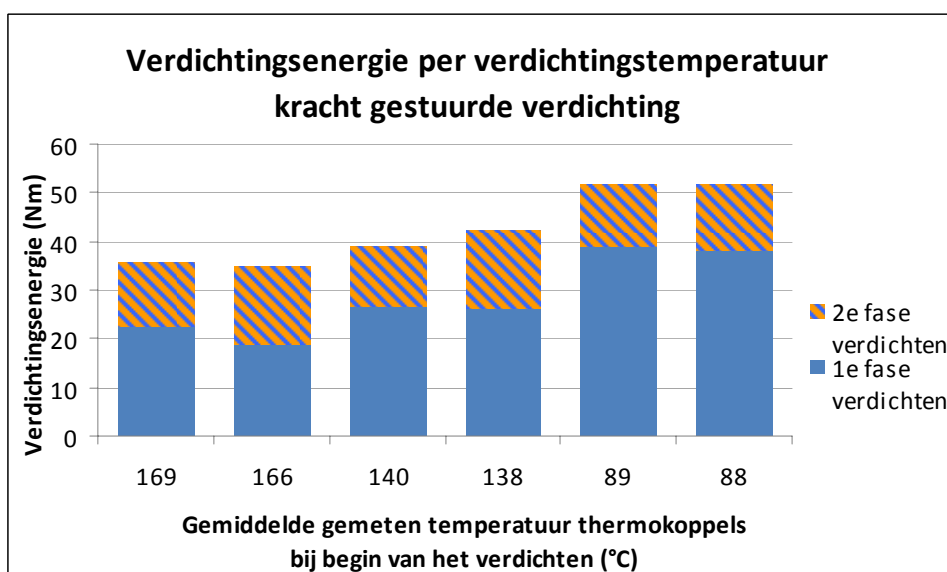
geconcludeerd worden dat bij een lagere verdichtingstemperatuur het moeilijker wordt om de eindlaagdikte te behalen, waardoor mogelijk vlakheidsproblemen kunnen ontstaan.



Figuur 4.33: Verdichtingsprogressie per verdichtingstemperatuur kracht gestuurde verdichting

In figuur 4.34 is de verdichtingsenergie per verdichtingstemperatuur weergegeven. De temperaturen op de X-as zijn de gemiddelde gemeten temperatuur door de drie thermokoppels.

Bij de eerste fase (positie gestuurde verdichting naar 84 mm) neemt de verdichtingsenergie toe, wanneer de verdichtingstemperatuur afneemt. Ten opzichte van de gemiddelde verdichtingstemperatuur is bij de hogere verdichtingstemperatuur 12,3 Nm meer verdichtingsenergie nodig en bij de lagere verdichtingstemperatuur is 5,5 Nm minder verdichtingsenergie nodig. Bij de tweede verdichtingsfase (kracht gestuurde verdichting naar 80 mm) varieert de verdichtingsenergie van 13 tot 16 Nm, waarbij geen duidelijke relatie zichtbaar is tussen de verdichtingstemperatuur en de verdichtingsenergie.



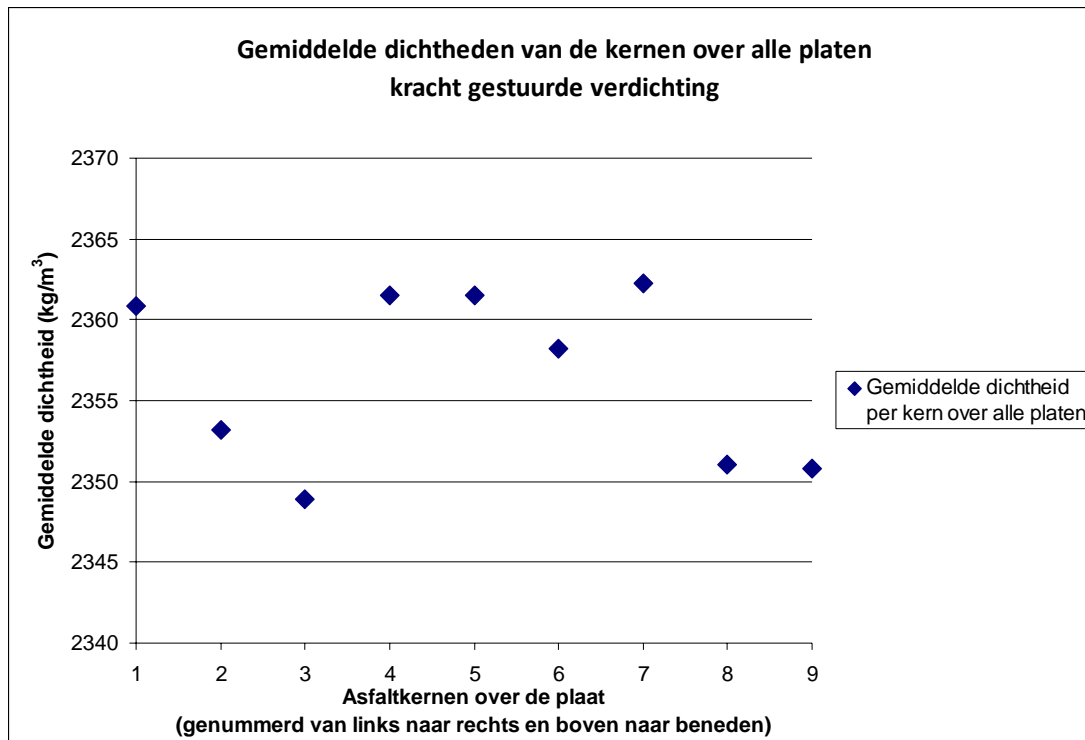
Figuur 4.34: Verdichtingsenergie kracht gestuurde verdichting per walsovergang kracht gestuurde verdichting

2.2.2.3 Dichtheid

De proefstukken zijn getoetst (=meten, vergelijken met de norm en het trekken van een conclusie) op hun afmetingen (diameter en hoogte) en de dichtheid. Hieruit kan geconcludeerd worden dat alle proefstukken voldoen aan de eisen van de afmetingen; hoogte en diameter. Voor wat betreft de dichtheid is één kern van plaat 23 met een te lage dichtheid (5 kg/m^3 te weinig), welke buiten de analyse is gehouden en verder voldoen alle kernen aan de beoogde dichtheid.

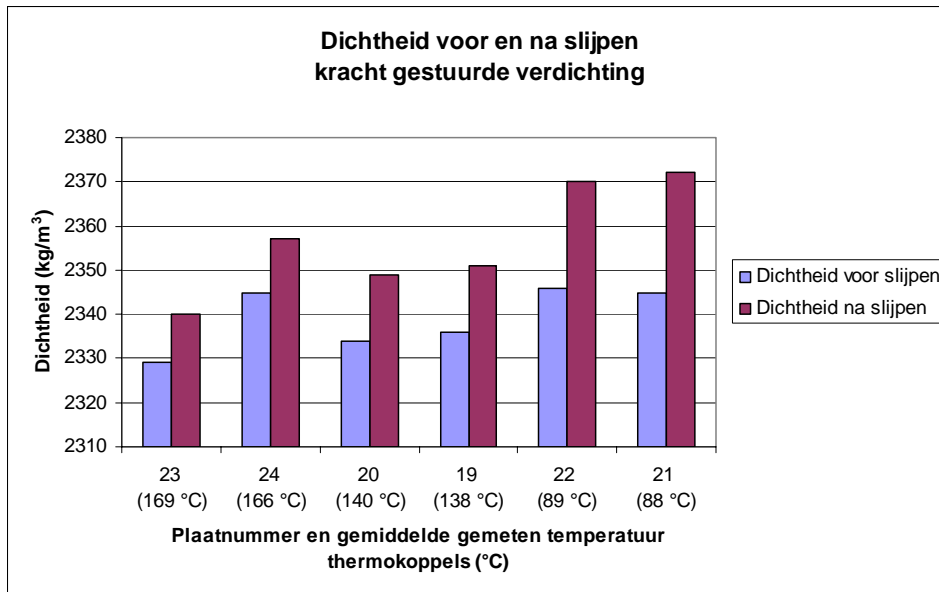
In figuur 4.35 zijn de gemiddelde dichtheden van de kernen over de plaat weergegeven (de nummers van de kernen komen overeen met de nummers uit figuur 4.6). De kernen zijn genummerd over de walsrichting van links naar en van boven naar beneden. Hierbij valt op dat de kernen 2&3 en 8&9, dus het midden en rechts van de voor- en achterkant (ten opzichte van de walsrichting), structureel een lagere dichtheid (10 kg/m^3) hebben dan de overige kernen.

Omdat de dichtheden van de kernen over de platen ongeveer eenzelfde structuur vertonen is ervoor gekozen om standaard op de kernen 3, 5 en 7 een triaxiaalproef te doen en op de kernen 1, 2, 4, 6, 8 en 9 slijtproeven te doen. Op deze manier worden op elke hoogte en breedte van de plaat beide soorten mechanische proeven uitgevoerd en is de verdeling qua dichtheid over de platen gelijkwaardig.



Figuur 4.35: Verdeling dichtheden van de kernen over de plaat kracht gestuurde verdichting

Vervolgens is het effect van het slijpen op de dichtheid bij de kracht gestuurde verdichting onderzocht. De gemiddelde dichtheden van de kernen voor en na het slijpen zijn weergegeven in figuur 4.36. Hierbij valt op dat de gemiddelde dichtheidsverbetering varieert van 10 tot 27 kg/m^3 en procentueel is dit een variatie van $0,5\%$ tot $1,0\%$, waarbij het slijpen meer dichtheidsverbetering heeft wanneer de verdichtingstemperatuur omlaag gaat. De proefstukken die in het laboratorium beproefd worden, zijn dus beter dan het asfalt in werkelijkheid, omdat de boven- onderkant er afgeslepen is. Bij de hoge verdichtingstemperaturen vindt een dichtheidsverbetering plaats van 10 kg/m^3 en bij de hogere verdichtingstemperaturen vindt een dichtheidsverbetering plaats van 27 kg/m^3 . Dit betekent dat de boven- en onderkant van het proefstuk verdicht bij de lage verdichtingstemperaturen een grotere afwijking ten opzichte van de gemiddelde dichtheid hebben dan de proefstukken verdicht bij de overige verdichtingstemperaturen.

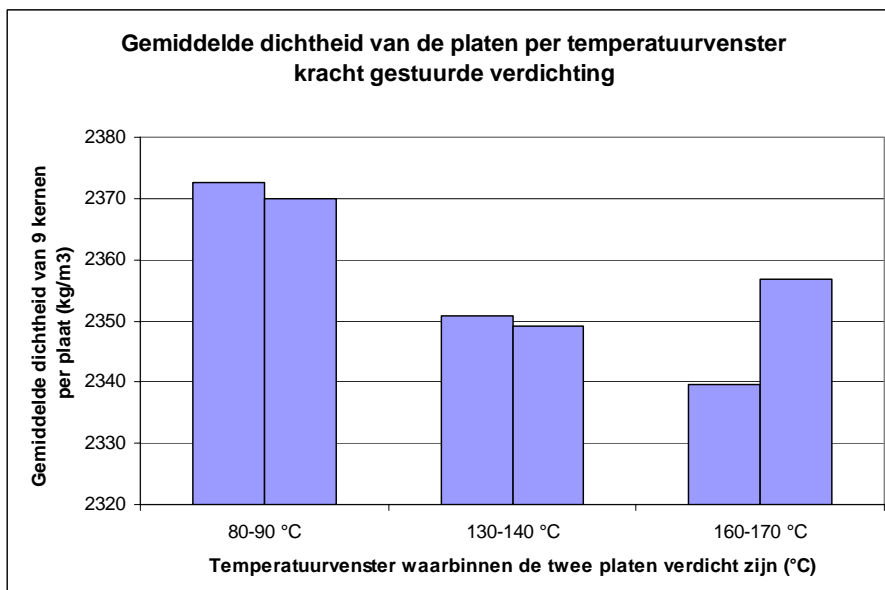


Figuur 4.36: Dichtheid voor en na slijpen kracht gestuurde verdichting

In figuur 4.37 zijn de gemiddelde dichtheden van de platen per verdichtingstemperatuur weergegeven. De temperatuur die in deze figuur is weergegeven is het temperatuurvenster gemeten met de thermokoppels over de twee platen. De werkelijke verdichtingstemperaturen over de verticale richting van het asfalt per plaat zijn besproken in paragraaf 2.1.3.1.

In de figuur valt op dat de dichtheden bij een verdichtingstemperatuur van 88-89 °C, evenals bij de positie gestuurde verdichting, een stuk hoger liggen dan de dichtheden van de andere verdichtingstemperaturen, ongeveer 22 kg/m³ en dat is ongeveer 0,9%. Dit is opvallend, omdat de temperatuur van het mengsel lager is en dus minder viskeus. Hieruit kan geconcludeerd worden dat zelfs bij een verdichtingstemperatuur van 80 °C met de Freundl plaatverdichter de beoogde dichtheid gehaald kan worden.

Bij de positie gestuurde verdichting is geconcludeerd dat er meer kracht nodig is om tot 80 mm te verdichten naarmate de verdichtingstemperatuur omlaag gaat. Wanneer de kracht om te verdichten gelijk gehouden wordt (kracht gestuurde verdichting), is het dus vreemd dat een lagere verdichtingstemperatuur tot een betere dichtheid leidt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het elastisch effect (terugveereffect) bij hogere temperaturen groter is dan bij lagere temperaturen.



Figuur 4.37: Gemiddelde dichtheid per verdichtingstemperatuur kracht gestuurde verdichting

2.2.2.4 Mechanische eigenschappen

Om de mechanische eigenschappen met betrekking tot spoorvorming en scheurvorming te bepalen zijn, net zoals bij de positie gestuurde verdichting, slijt- en triaxiaalproeven uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn in deze paragraaf besproken.

Slijtproef

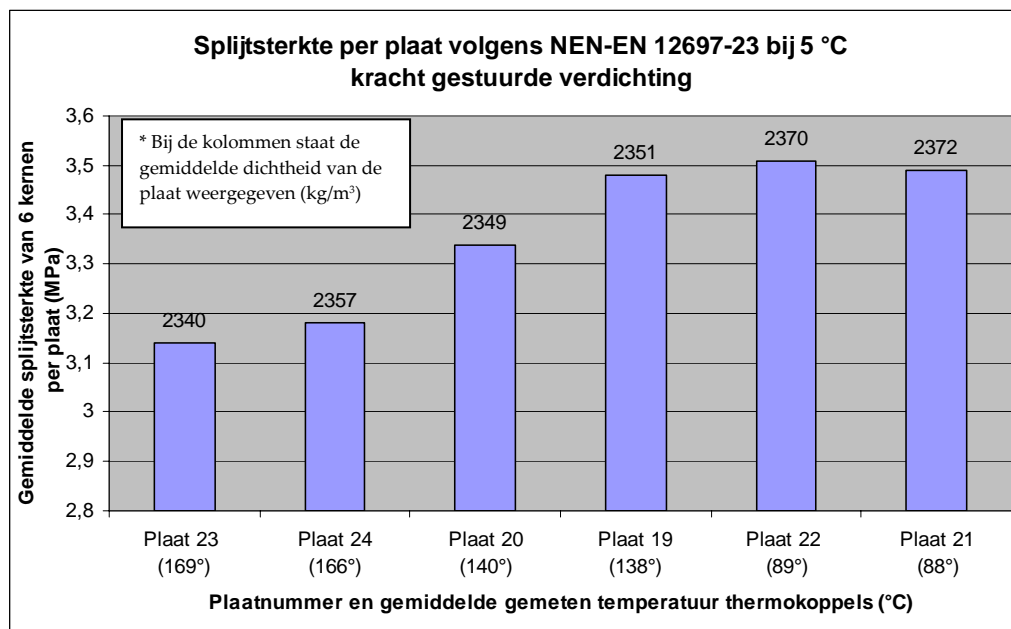
Om de weerstand tegen scheurvorming te bepalen zijn slijtproeven uitgevoerd, waarbij een drietal aspecten zijn vergeleken; de slijtsterkte (oftewel de indirecte treksterkte), de scheurtaaiheid en de daarbij horende scheursnelheid. Achtereenvolgens worden de resultaten van de slijtproeven van de kracht gestuurde verdichting besproken.

N.B. In de figuren zijn op de X-as de gemiddelde gemeten temperaturen met de thermokoppels weergegeven. De labels in de figuren geven de gemiddelde dichtheid per plaat over de negen geboorde kernen weer.

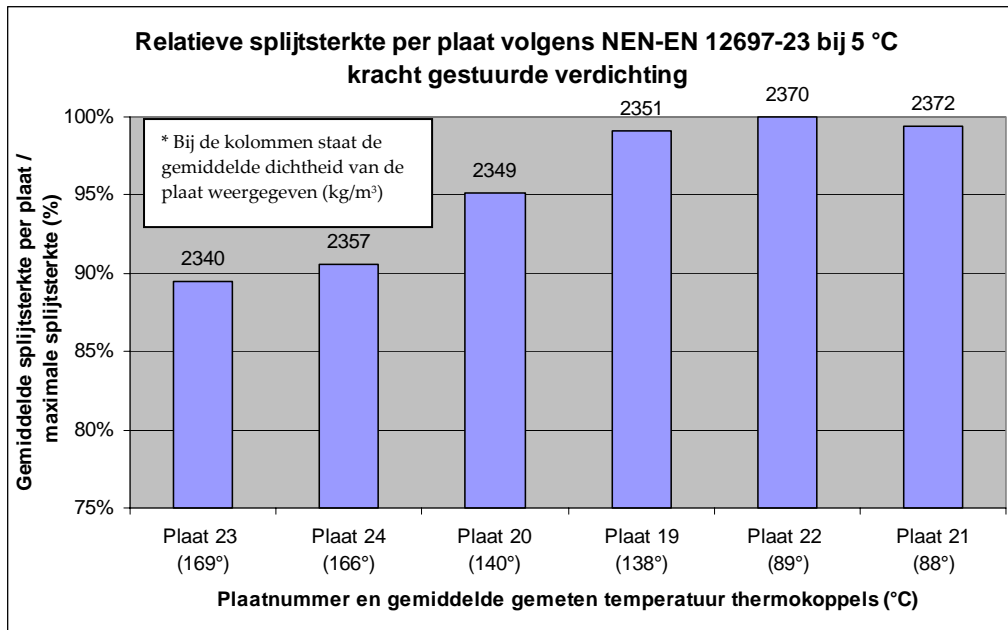
N.B.(2). Per plaat zijn een zestal slijtproeven uitgevoerd. De resultaten van deze zes kernen per plaat zijn gemiddeld, omdat de kernen redelijk gelijke resultaten opleverden.

Bij een aantal kernen is de slijtproef min of meer mislukt, omdat de kern meer afschoof dan dat het spleet, oftewel de kern is al gespleten, maar blijft nog hangen tussen het hulpstuk van de testbank. Dit is geïllustreerd met een foto en het resultaat in figuur 4.21. Deze resultaten zijn niet meegenomen in de analyse.

In figuur 4.38 is de gemiddelde slijtsterkte per plaat absoluut weergegeven en in figuur 4.39 is de relatieve slijtsterkte per plaat weergegeven. Hierbij is duidelijk te zien dat de hogere verdichtings-temperaturen (166 °C en 169 °C) leiden tot een lagere slijtsterkte (gemiddeld 0,3 Mpa lager) dan de overige verdichtingstemperaturen. Procentueel is dit een afname van 8% slijtsterkte.



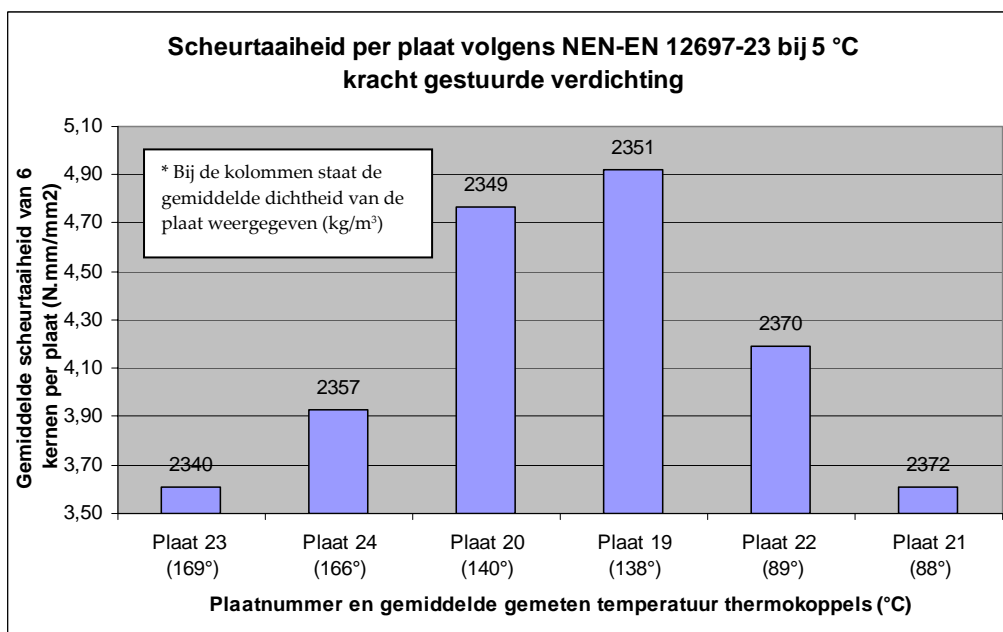
Figuur 4.38: Slijtsterkte per plaat kracht gestuurde verdichting



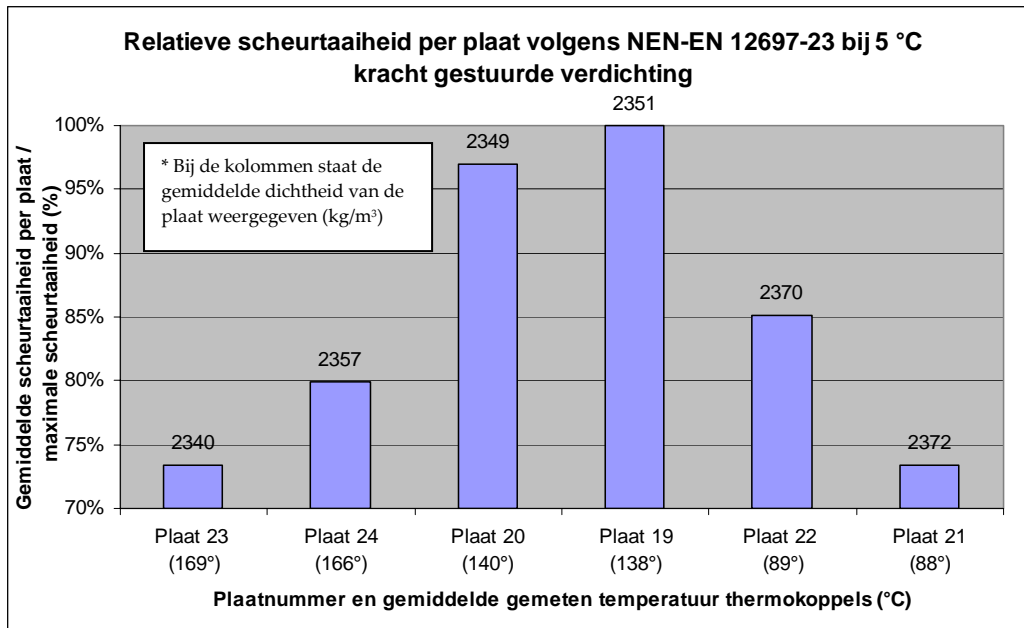
Figuur 4.39: Relatieve spijjsterkte per plaat kracht gestuurde verdichting

In figuur 4.40 is de scheurtaaiheid per plaat absoluut weergegeven en in figuur 4.41 is de relatieve scheurtaaiheid weergegeven. Hierbij lijkt wederom, net als bij de positie gestuurde verdichting, een duidelijk verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht bij een temperatuur van 140 °C en 138 °C hebben duidelijk een hogere scheurtaaiheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C is de scheurtaaiheid gemiddeld 1,0 N.mm/mm² hoger dan bij de overige verdichtingstemperaturen en dat betekent een afname van ongeveer 20% scheurtaaiheid bij proefstukken verdicht bij de overige verdichtingstemperaturen.

Verder is er geen verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en dichtheid. Platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid. Hieruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid.

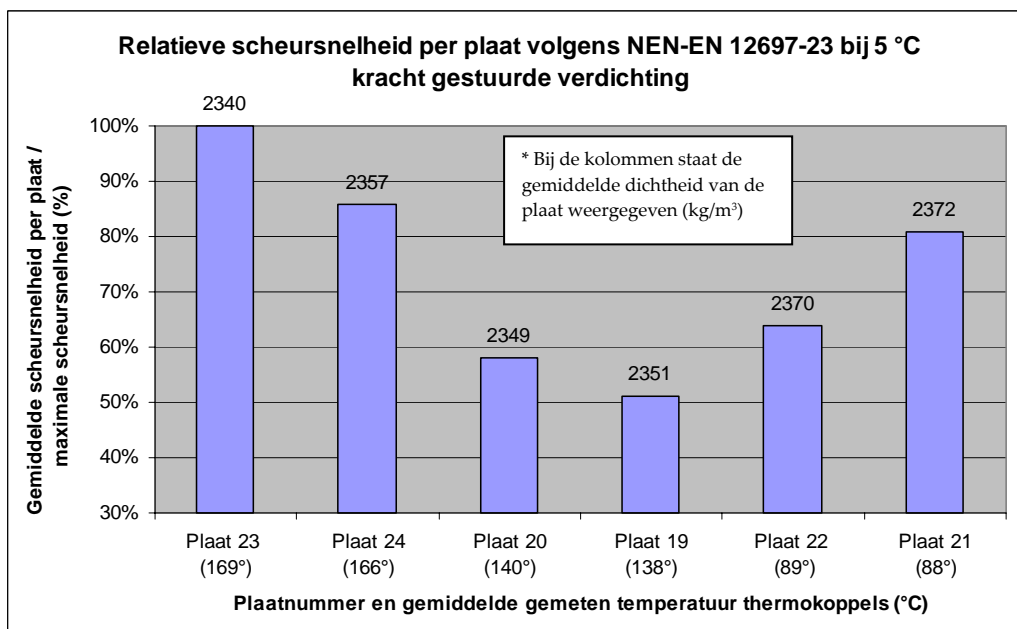


Figuur 4.40: Scheurtaaiheid per plaat kracht gestuurde verdichting



Figuur 4.41: Relatieve scheurtaaiheid per plaat kracht gestuurde verdichting

Vervolgens is de relatieve scheursnelheid per plaat (en verdichtingstemperatuur) weergegeven in figuur 4.42. Wederom lijkt er een relatie aanwezig met de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht bij een temperatuur van 140 °C en 138 °C hebben duidelijk een lagere scheursnelheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Relatief is de scheursnelheid bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C, 30% lager dan de scheursnelheid bij de overige verdichtingstemperaturen en dus is de verdichtingstemperatuur ook een belangrijke parameter voor de scheursnelheid.



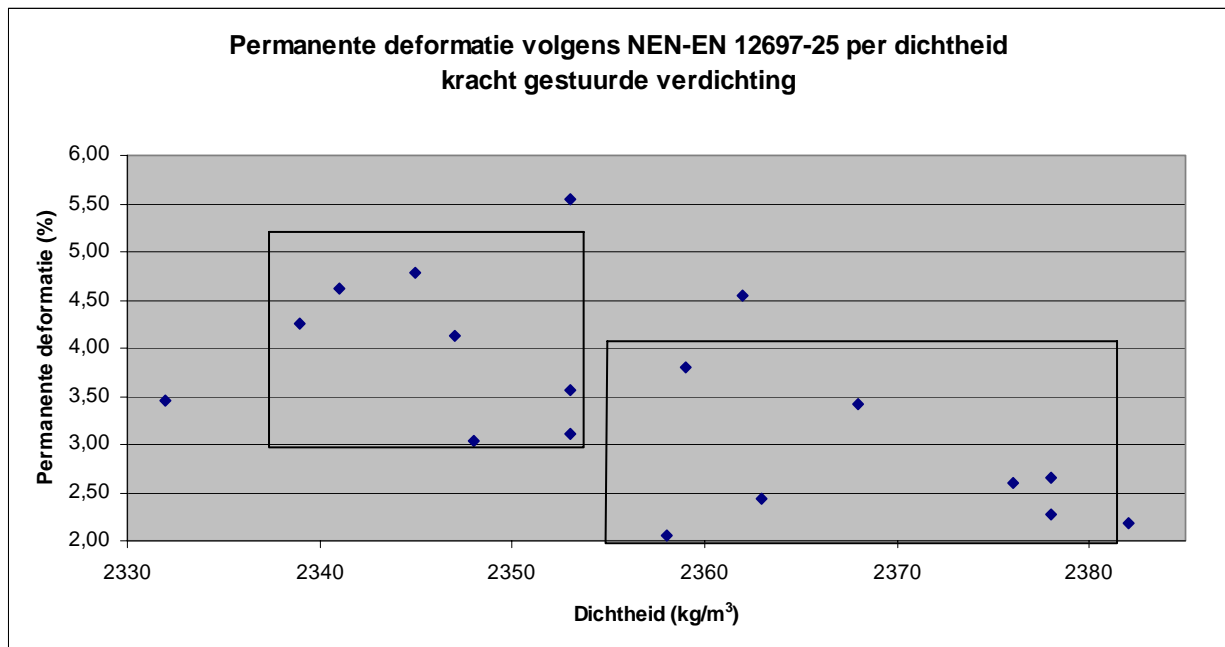
Figuur 4.42: Relatieve scheursnelheid per plaat kracht gestuurde verdichting

Triaxiaalproef

Om de weerstand tegen spoorvorming te bepalen zijn triaxiaalproeven in de NAT (Nottingham asphalt tester) uitgevoerd, waarbij de cumulatieve rek na 10.000 lastherhalingen is vergeleken. Achtereenvolgens worden de resultaten van de triaxiaalproeven besproken.

N.B. Bij een aantal kernen zijn er waarden gecorrigeerd, omdat de LVDT's (verplaatsingssensoren) soms een rare waarde registreren. Dit is weergegeven in figuur 4.27.

In figuur 4.43 is de permanente deformatie uitgezet tegenover de dichtheid voor alle kernen. Hierbij lijkt er een relatie te zijn tussen de dichtheid en de permanente deformatie; een hogere dichtheid lijkt te leiden tot minder permanente deformatie. Binnen een range van dichtheden van 2339 kg/m³ tot 2353 kg/m³ is een gemiddelde permanente deformatie van 3,9% te zien en binnen een range van 2358 kg/m³ en 2382 kg/m³ is een gemiddelde permanente deformatie van 2,7% te zien, oftewel een verschil van 1,2% permanente deformatie, hetgeen een significant verschil is (30% verschil in relatieve permanente deformatie).

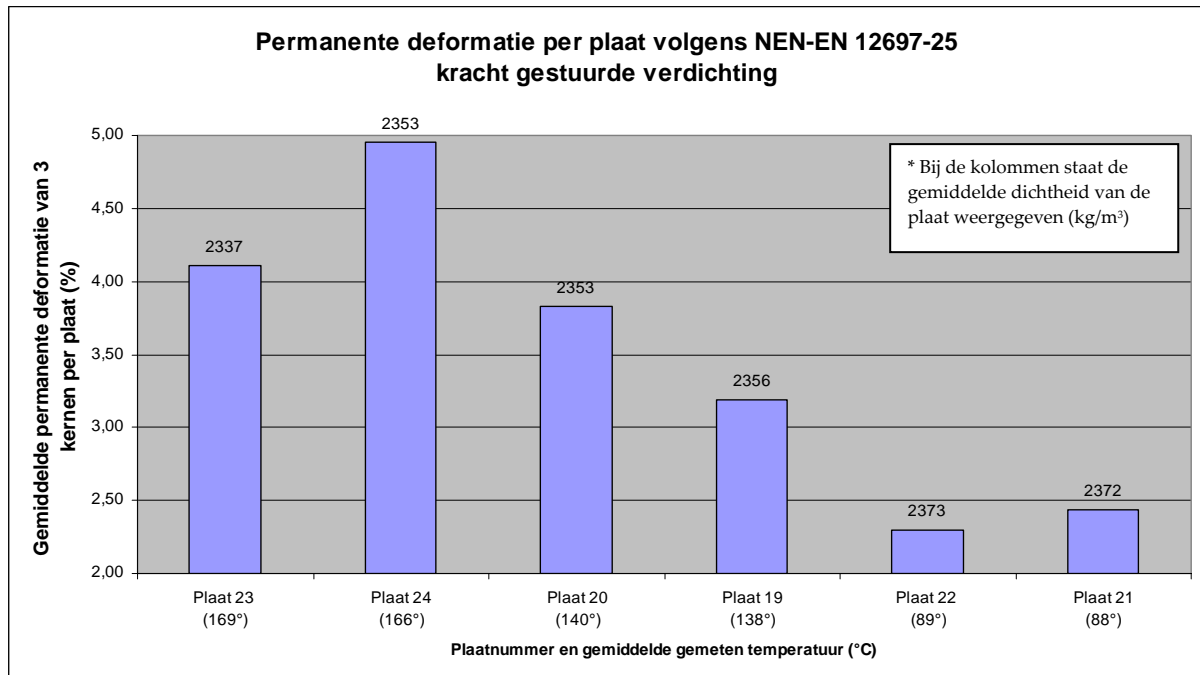


Figuur 4.43: Permanente deformatie per dichtheid kracht gestuurde verdichting

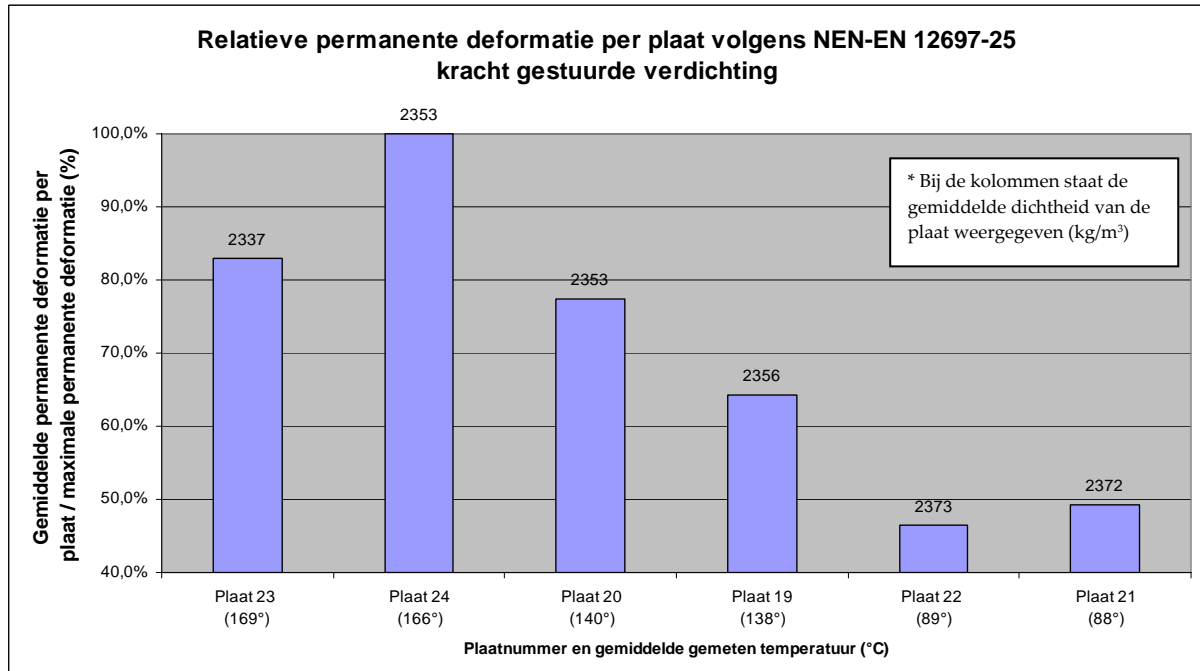
In figuur 4.44 is de gemiddelde permanente deformatie per plaat (en dus per verdichtingstemperatuur) absoluut weergegeven en in figuur 4.45 is de gemiddelde permanente deformatie per plaat relatief weergegeven. Hierbij zijn op de X-as de gemiddelde gemeten temperaturen met de thermokoppels weergegeven. De labels in de figuren geven de gemiddelde dichtheid per plaat over de 9 geboorde kernen weer.

Er lijkt een relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de permanente deformatie zichtbaar; des te hoger de verdichtingstemperatuur, hoe hoger de permanente deformatie. De verdichtingstemperaturen 169 °C en 166 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 4,5%, de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 3,5% en de verdichtingstemperaturen 89 °C en 88 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 2,4%. Relatief gezien is dat een toename van 20% permanente deformatie bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C en een toename van 45% permanente deformatie bij de verdichtingstemperaturen 166 °C en 169 °C ten opzichte van de verdichtingstemperaturen 88 °C en 89 °C. De vraag is of dit verschil komt door het verschil in dichtheid of door het verschil in verdichtingstemperatuur. Geconcludeerd kan wel worden dat proefstukken verdicht met een relatief lagere verdichtingstemperatuur leidend tot een relatief hogere dichtheid, een lagere permanente deformatie hebben dan proefstukken verdicht bij een hogere

temperatuur leidend tot een lagere dichtheid, maar hoe groot het aandeel van iedere variabele (dichtheid en verdichtingstemperatuur) is, blijft onduidelijk. Logisch lijkt dat de dichtheid meer invloed heeft op de permanente deformatie dan de verdichtingstemperatuur, omdat bij een lagere dichtheid meer risico op naverdichting is, waardoor de kans op de permanente deformatie groter is.



Figuur 4.44: Gemiddelde permanente deformatie per plaat kracht gestuurde verdichting



Figuur 4.45: procentuele gemiddelde permanente deformatie per plaat kracht gestuurde verdichting

2.2.2.5 Conclusies kracht gestuurde verdichting

Bij de kracht gestuurde verdichting zijn er asfaltplaten met een zelfde verdichtingskracht verdicht met de Freundl plaatverdichter bij verschillende verdichtingstemperaturen variërend van 80 °C tot 170 °C. Het maximale temperatuurverschil in de asfaltplaten is 17 °C en gemiddeld is het temperatuurverschil 12 °C, hetgeen duidt op een redelijk homogene temperatuur binnen de asfaltplaat. Daarbij dient wederom opgemerkt te worden dat de temperaturen aan de zijkant van de asfaltplaat gemeten zijn, waarvan verwacht wordt dat daar de grootste temperatuurverschillen optreden, dus zijn de gemeten verschillen zeer waarschijnlijk ook echt de maximale verschillen.

De resultaten van de kracht gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter zijn geanalyseerd op de verdichtingsprogressie en de verdichtingsenergie.

Bij de verdichtingsprogressie van de kracht-gestuurde verdichting valt op dat de laagdikte in het begin afneemt, vervolgens weer toeneemt, waarna vervolgens de laagdikte redelijk constant afneemt. Het moment waarop dit terugveereffect tijdens verdichting plaatsvindt varieert per verdichtingstemperatuur; bij de hogere verdichtingstemperaturen vindt dit effect plaats na ongeveer 13 walsovergangen en bij de lagere verdichtingstemperaturen vindt dit effect plaats na ongeveer 4 walsovergangen. Waarschijnlijk ligt de oorzaak hiervan bij manier van meten van de laagdikte door de Freundl plaatverdichter, omdat de Freundl plaatverdichter moet zoeken naar de juiste hoogte om te beginnen met verdichten, waarbij het walssegment bij de hogere verdichtingstemperaturen meer wegzakt in het asfaltmengsel en daardoor langer moet zoeken naar de juiste beginhoogte.

Het tweede opvallende aspect bij de verdichtingsprogressie is de eindlaagdikte die de Freundl plaatverdichter meet per verdichtingstemperatuur. De lagere verdichtingstemperaturen bereiken een eindlaagdikte van gemiddeld 82,6 mm, de gemiddelde verdichtingstemperaturen een eindlaagdikte van 81,9 mm en de hogere verdichtingstemperaturen bereiken een gemiddelde eindlaagdikte van 81,4 mm. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij een lagere verdichtingstemperatuur het moeilijker wordt om de eindlaagdikte te behalen.

Vervolgens is de verdichtingsenergie geanalyseerd. Bij de kracht gestuurde verdichting naar 80 mm varieert de verdichtingsenergie van 13 tot 16 Nm, waarbij geen duidelijke relatie zichtbaar is tussen de verdichtingstemperatuur en de verdichtingsenergie.

Vervolgens zijn uit de asfaltplaten negen kernen per plaat geboord en geslepen, waarbij de dichtheden van de asfaltplaten zijn geanalyseerd.

Bij de verdeling van de dichtheid over de plaat valt op dat de kernen 2&3 en 8&9, dus het midden en rechts van de voor- en achterkant ten opzicht van de walsrichting (figuur 4.2), structureel een lagere dichtheid (10 kg/m^3) hebben dan de overige kernen.

Vervolgens is het effect van het slijpen op de dichtheid onderzocht. Hierbij valt op dat de gemiddelde dichtheidsverbetering varieert van 10 tot 27 kg/m^3 en procentueel is dit een variatie van 0,5% tot 1,0%, waarbij het slijpen meer dichtheidsverbetering heeft wanneer de verdichtingstemperatuur omlaag gaat. Bij de hoge verdichtingstemperaturen vindt een dichtheidsverbetering plaats van 10 kg/m^3 en bij de hogere verdichtingstemperaturen vindt een dichtheidsverbetering plaats van 27 kg/m^3 . Dit betekent dat de boven- en onderkant van het proefstuk verdicht bij de lage verdichtingstemperaturen een grotere afwijking ten opzichte van de gemiddelde dichtheid hebben dan de proefstukken verdicht bij de overige verdichtingstemperaturen.

Uiteindelijk zijn de gemiddelde dichtheden van de platen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd. Hierbij valt op dat de dichtheden bij een verdichtingstemperatuur van 88 °C, evenals bij de positie gestuurde verdichting, een stuk hoger liggen dan de dichtheden van de andere verdichtingstemperaturen, ongeveer 22 kg/m^3 en dat is ongeveer 0,9%. Dit is opvallend, omdat de temperatuur van het mengsel lager is en dus minder viskeus. Hieruit kan geconcludeerd worden dat zelfs bij een verdichtingstemperatuur van 80 °C met de Freundl plaatverdichter de beoogde dichtheid gehaald kan worden.

Na het analyseren van de dichtheden zijn de mechanische eigenschappen van de kernen per verdichtingstemperatuur geanalyseerd op basis van de splijtsterkte, de scheurtaaiheid, de relatieve scheursnelheid en de permanente deformatie.

Voor wat betreft de splijtsterkte is duidelijk te zien dat de hogere verdichtingstemperaturen (166 °C en 169 °C) een lagere splijtsterkte hebben (gemiddeld 0,3 Mpa lager) dan de overige verdichtingstemperaturen. Procentueel is dit een afname van 8% splijtsterkte.

Vervolgens lijkt, net zoals bij de positie gestuurde verdichting, een duidelijk verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht bij een temperatuur van 140 °C en 138 °C hebben duidelijk een hogere scheurtaaiheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Gemiddeld is de scheurtaaiheid 1,0 N.mm/mm² bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C hoger dan bij de overige verdichtingstemperaturen en dat betekent een afname van ongeveer 20% scheurtaaiheid bij de overige verdichtingstemperaturen ten opzichte van de verdichtingstemperaturen 138 °C en 140 °C. Er is geen verband zichtbaar tussen de scheurtaaiheid en dichtheid. Platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid. Hieruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid.

Verder is de relatieve scheursnelheid per plaat (en verdichtingstemperatuur) geanalyseerd. Wederom lijkt er een relatie aanwezig met de verdichtingstemperatuur. De platen verdicht bij een temperatuur van 140 °C en 138 °C hebben duidelijk een lagere scheursnelheid dan de andere platen die verdicht zijn bij een hogere of een lagere temperatuur. Relatief is de scheursnelheid bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C, 30% lager dan de scheursnelheid bij de overige verdichtingstemperaturen en dus is de verdichtingstemperatuur ook een belangrijke parameter voor de scheursnelheid.

Bij de kracht gestuurde verdichting lijkt er een relatie te zijn tussen de dichtheid en de permanente deformatie; een hogere dichtheid leidt tot minder permanente deformatie. Binnen een range van dichtheden van 2339 kg/m³ tot 2353 kg/m³ is een gemiddelde permanente deformatie van 3,9% te zien en binnen een range van 2358 kg/m³ en 2382 kg/m³ is een gemiddelde permanente deformatie van 2,7% te zien, oftewel een verschil van 1,2% permanente deformatie.

Verder lijkt er ook een relatie tussen de verdichtingstemperatuur en de permanente deformatie zichtbaar; des te hoger de verdichtingstemperatuur, hoe hoger de permanente deformatie. De verdichtingstemperaturen 169 °C en 166 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 4,5%, de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 3,5% en de verdichtingstemperaturen 89 °C en 88 °C hebben gemiddeld een permanente deformatie van 2,4%. Relatief gezien is dat een gemiddelde toename van 30% weerstand tegen spoorvorming bij de verdichtingstemperaturen 140 °C en 138 °C en een gemiddelde afname van 45% weerstand tegen spoorvorming bij de verdichtingstemperaturen 89 °C en 88 °C. De vraag is of dit verschil komt door het verschil in dichtheid of door het verschil in verdichtingstemperatuur. Geconcludeerd kan wel worden dat proefstukken verdicht met een relatief lagere verdichtingstemperatuur leidend tot een relatief hogere dichtheid een lagere permanente deformatie hebben dan proefstukken verdicht bij een hogere temperatuur leidend tot een lagere dichtheid, maar hoe groot het aandeel van iedere variabele (dichtheid en verdichtingstemperatuur) is, blijft onduidelijk. Logisch lijkt dat de dichtheid meer invloed heeft op de permanente deformatie dan de verdichtingstemperatuur, omdat bij een lagere dichtheid meer lucht wordt uitgedreven, waardoor de permanente deformatie groter is.

Wederom is de spreiding van de belangrijkste variabelen (dichtheid, temperatuur en de bitumen) geanalyseerd. Deze analyse is weergegeven in bijlage 2.4 (deel 3). Ook bij de kracht gestuurde verdichting kan geconcludeerd worden dat de spreiding van de belangrijkste variabelen binnen de beoogde doelen vallen.

Resumé: Uit de resultaten van de kracht gestuurde verdichting met de Freundl plaatverdichter blijkt, evenals bij de positie gestuurde verdichting, dat de beoogde dichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen gehaald kan worden, maar dat er wel een groot verschil tussen de scheurtaaiheid en scheursnelheid bij verschillende verdichtingstemperaturen bestaat.

De verdichtingstemperatuur, de scheurtaaiheid en scheursnelheid lijken op basis van beide verdichtingsprocedures efficiëntere parameters om het asfalt(mengsel) te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

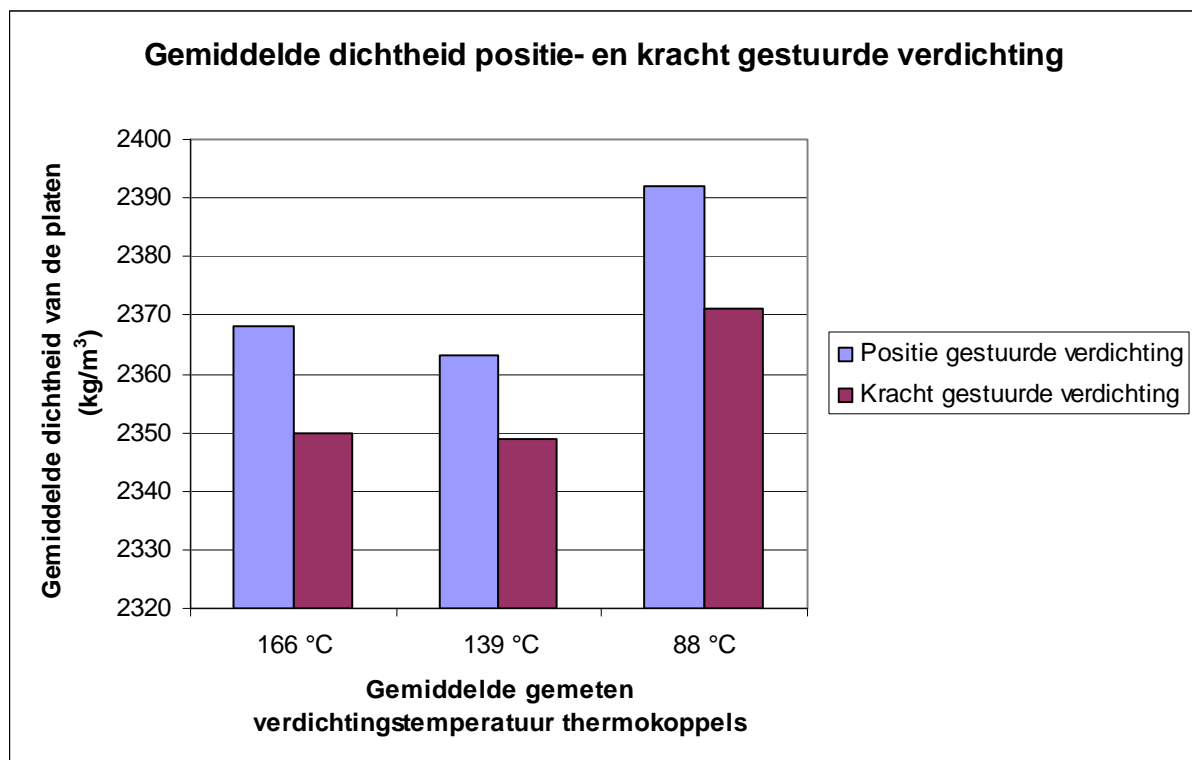
2.2.3 Positie gestuurde verdichting versus kracht gestuurde krachtverdichting

In deze paragraaf zullen de twee verdichtingsprocedures en de resultaten hiervan worden vergeleken. Ten eerste is ingegaan op de behaalde dichtheden en daarna zijn de behaalde mechanische eigenschappen vergeleken.

N.B. Op de X-assen in de figuren zijn de gemiddelde gemeten temperatuur met de thermokoppels van de kracht- en positie gestuurde verdichting weergegeven.

2.2.3.1 Dichtheid

De gekozen verdichtingsprocedures in dit onderzoek hebben geleid tot verschillende dichtheden en deze zijn weergegeven in figuur 4.46. Hierbij valt op dat de positie gestuurde verdichting structureel tot hogere dichtheden leidt. Relatief zijn de verschillen in dichtheid niet zo groot (0,6% tot 0,9%), maar absoluut zijn deze verschillen wel significant (14 kg/m³ tot 21 kg/m³). Dit wil niet zeggen dat de positie gestuurde verdichting een betere verdichtingsprocedure is, want het gaat erom welke verdichtingsprocedure de werkelijkheid zo goed mogelijk simuleert. In paragraaf 4.3 zijn de resultaten van de praktijkmetingen vergeleken met de resultaten uit het laboratorium, waarna verder is ingegaan op de relatie tussen het laboratorium en de praktijk.

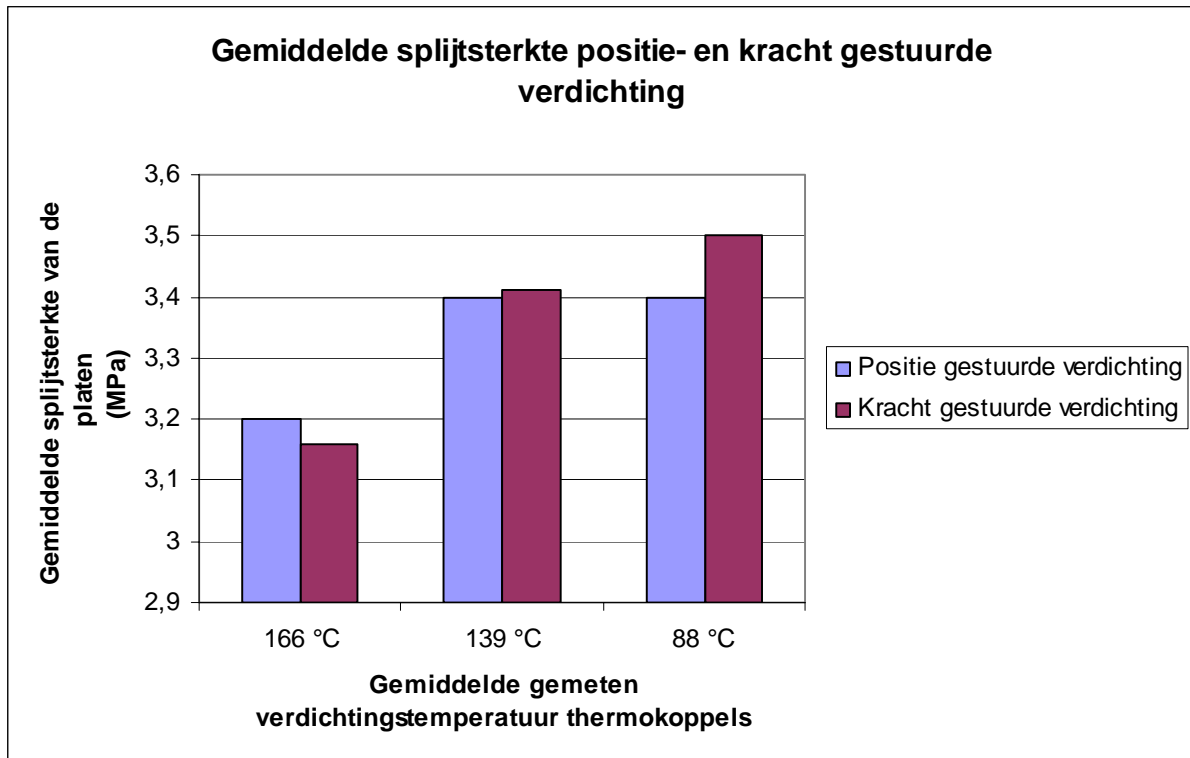


Figuur 4.46: Dichtheid positie- en kracht gestuurde verdichting

2.2.3.2 Mechanische eigenschappen

De gekozen verdichtingsprocedures hebben ook geleid tot verschillende mechanische eigenschappen. In deze paragraaf worden de resultaten van de slijtsterkte, de scheurtaaiheid, de scheursnelheid en de permanente deformatie voor de positie- en kracht gestuurde verdichting met elkaar vergeleken.

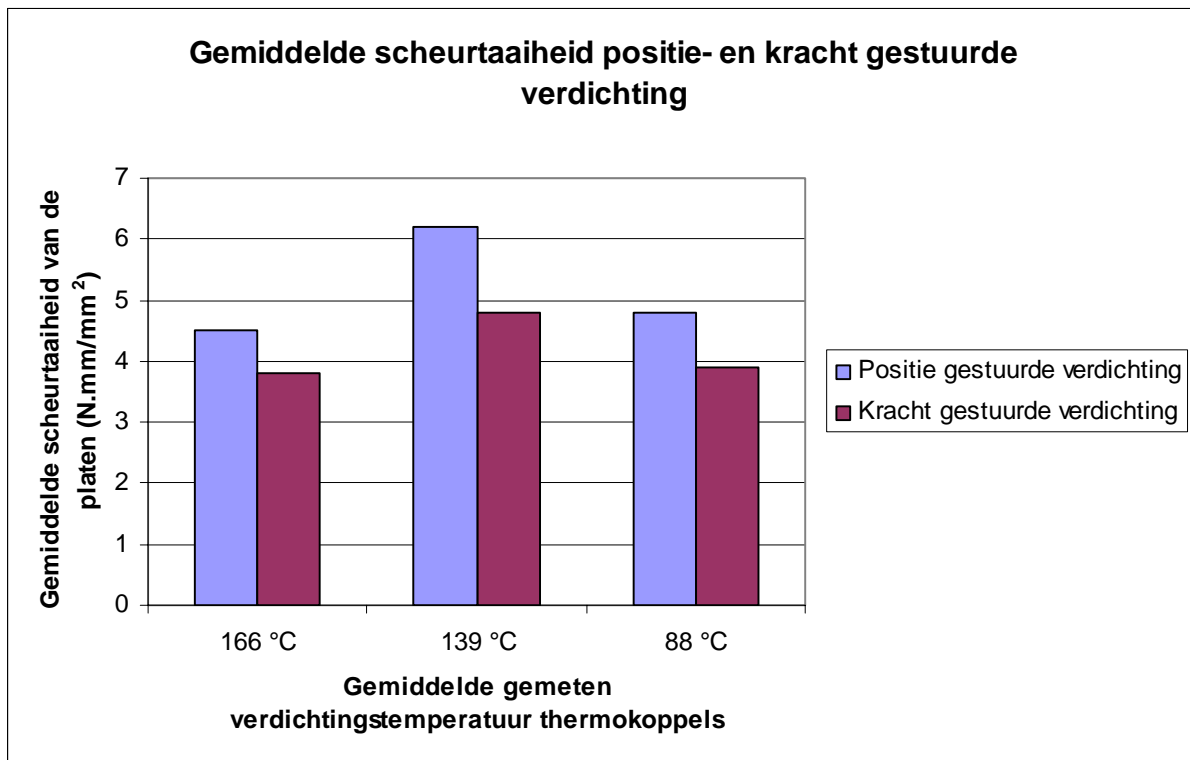
In figuur 4.47 is de splijtsterkte voor de positie- en kracht gestuurde verdichting weergegeven. Bij een verdichtingstemperatuur van 166 °C heeft de positie gestuurde verdichting een hogere splijtsterkte en bij een verdichtingstemperatuur van 88 °C heeft de kracht gestuurde verdichting een hogere splijtsterkte en bij 139 °C is het verschil nihil. Er is dus geen duidelijk verband tussen de splijtsterkte en de verdichtingsprocedure.



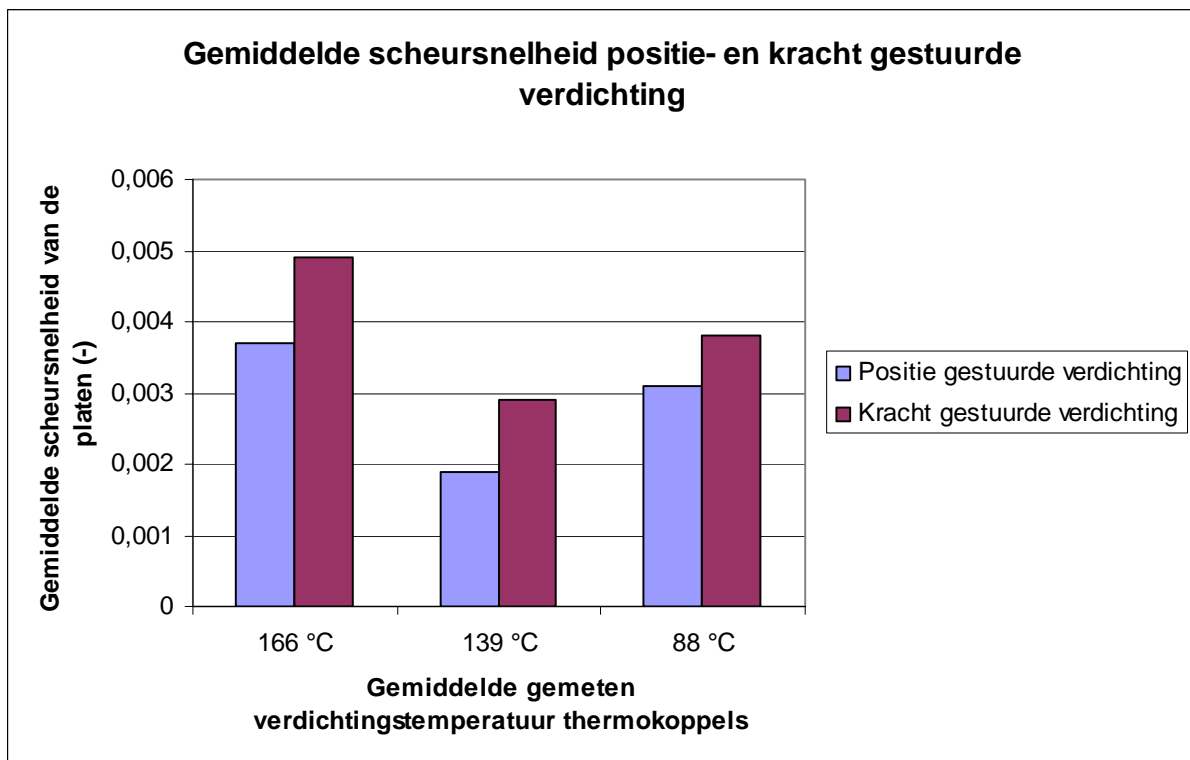
Figuur 4.47: Splijtsterkte positie- en kracht gestuurde verdichting

In figuur 4.48 is de scheurtaaiheid voor de positie- en kracht gestuurde verdichting weergegeven. Structureel heeft de positie gestuurde verdichting een hogere scheurtaaiheid dan de kracht gestuurde verdichting. Absoluut en relatief zijn de verschillen aanzienlijk, absoluut variërend per verdichtingstemperatuur van 0,7 tot 1,4 N.mm/mm², hetgeen procentuele verschillen zijn variërend van 16% tot 23%. Wederom hoeft dit niet te betekenen dat de positie gestuurde verdichting een betere verdichtingsprocedure is, want het gaat erom welke verdichtingsprocedure de werkelijkheid zo goed mogelijk simuleert.

In figuur 4.49 is de scheursnelheid voor de positie- en kracht gestuurde verdichting te zien. Omdat de scheursnelheid een functie is van de splijtsterkte (waar geen duidelijk verband zichtbaar was) en de scheurtaaiheid (waar de scheurtaaiheid van de positie gestuurde verdichting structureel hoger was) is te zien dat de scheursnelheid bij de kracht gestuurde verdichting structureel hoger is (omdat de scheurtaaiheid structureel lager is). Omdat de scheursnelheid dimensieloos is kan de scheursnelheid alleen relatief (procentueel) worden vergeleken. De procentuele verschillen in scheursnelheid per verdichtingsprocedure zijn aanzienlijk, variërend per verdichtingstemperatuur van 18% tot 35%.

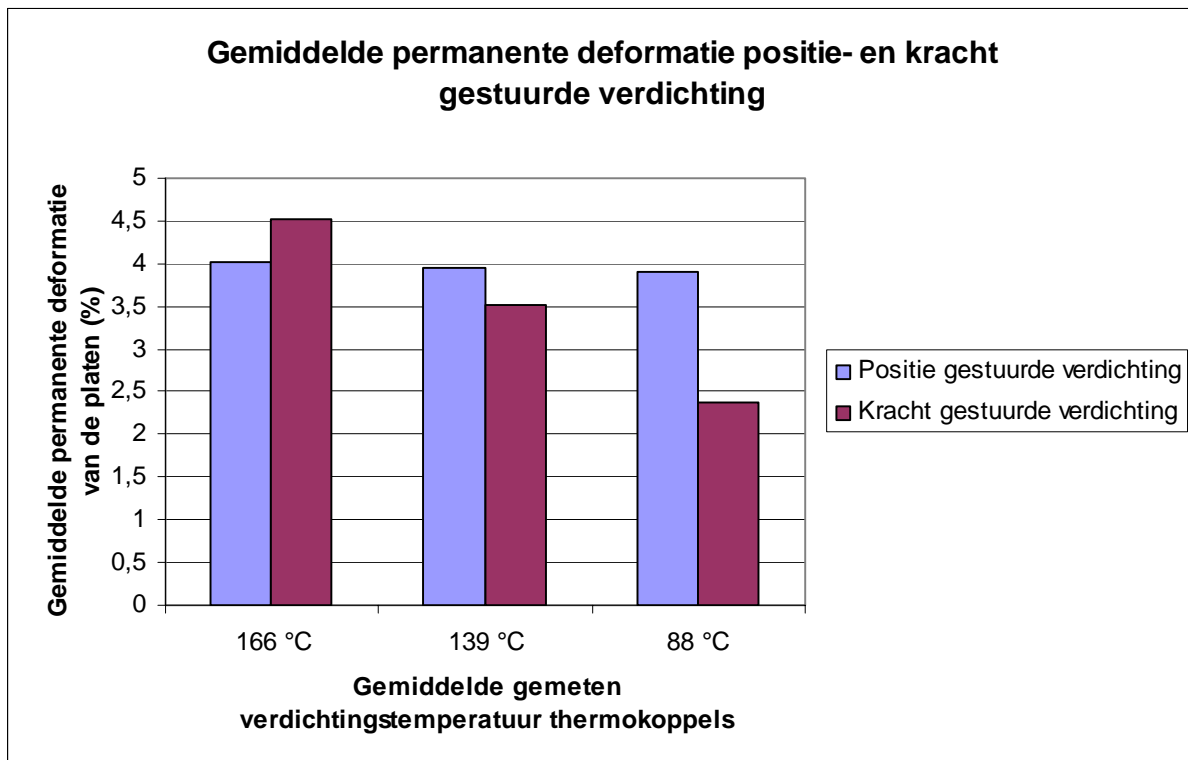


Figuur 4.48: Scheurtaaiheid positie- en kracht gestuurde verdichting



Figuur 4.49: Scheursnelheid positie- en kracht gestuurde verdichting

In figuur 4.50 is de permanente deformatie voor de positie- en kracht gestuurde verdichting weergegeven. Bij een verdichtingstemperatuur van 166 °C heeft de kracht gestuurde verdichting een hogere permanente deformatie en bij een verdichtingstemperatuur van 139 °C en 88 °C heeft de positie gestuurde verdichting een hogere permanente deformatie. Er is dus geen duidelijk verband tussen de permanente deformatie en de verdichtingsprocedure.



Figuur 4.50: Permanente deformatie positie- en kracht gestuurde verdichting

2.2.3.3 Conclusies positieverdichting versus krachtdichting

In deze paragraaf zijn de positie- en kracht gestuurde verdichting met elkaar vergeleken op dichtheid en mechanische eigenschappen.

De positie- en kracht gestuurde verdichting hebben geleid tot verschillende dichtheden. Hierbij valt op dat de positie gestuurde verdichting structureel tot hogere dichtheden leidt. Relatief zijn de verschillen in dichtheid niet zo groot (0,6% tot 0,9%), maar absoluut zijn deze verschillen wel significant (14 kg/m³ tot 21 kg/m³).

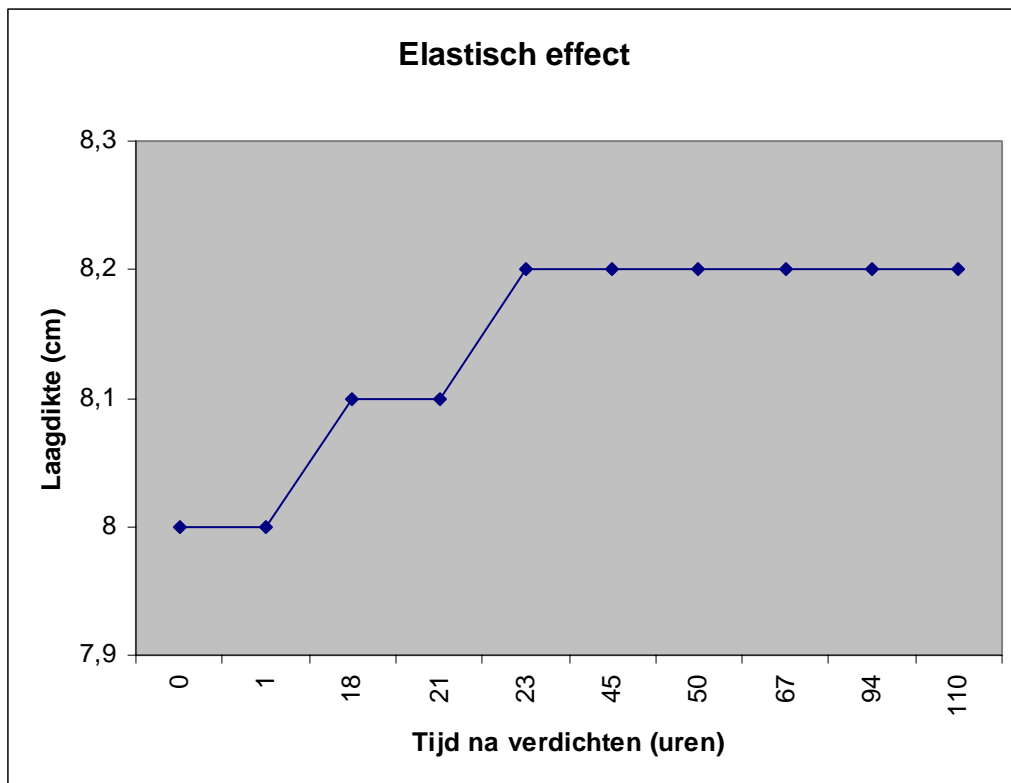
De gekozen verdichtingsprocedures hebben ook geleid tot verschillende mechanische eigenschappen en zijn vergeleken op splijtsterkte, scheurtaaiheid, scheursnelheid en permanente deformatie. Tussen de splijtsterkte en de verdichtingsprocedure is geen duidelijk verband gevonden. Voor wat betreft de scheurtaaiheid heeft de positie gestuurde verdichting structureel een hogere scheurtaaiheid dan de kracht gestuurde verdichting. Absoluut en relatief zijn de verschillen aanzienlijk, absoluut variërend per verdichtingstemperatuur van 0,7 tot 1,4 N.mm/mm², hetgeen relatieve verschillen zijn variërend van 16% tot 23%. Met betrekking tot de scheursnelheid is zichtbaar dat de kracht gestuurde verdichting structureel een hogere scheursnelheid heeft. De relatieve verschillen in scheursnelheid per verdichtingsprocedure variëren per verdichtingstemperatuur van 18% tot 35%. Verder is er geen duidelijk verband tussen de permanente deformatie en de verdichtingsprocedure gevonden.

Dat de positie gestuurde verdichting tot hogere dichtheden of betere mechanische resultaten bereikt wil niet zeggen dat de positie gestuurde verdichting een betere verdichtingsprocedure is, want het gaat erom welke verdichtingsprocedure de werkelijkheid zo goed mogelijk simuleert. In paragraaf 4.3 zijn de resultaten uit het laboratorium vergeleken met de resultaten van de praktijkmetingen, waarna verder is ingegaan op de relatie tussen het laboratorium en de praktijk en welke procedure op welke aspecten de werkelijkheid het best simuleert.

2.2.4 Elastische terugvering

Na het maken van een aantal platen is gebleken dat er een duidelijk elastisch effect is te zien bij de proefstukken gemaakt met Freundl plaatverdichter. Het is daarom belangrijk om te bepalen na hoeveel tijd dit elastisch effect uitgewerkt is en of dit effect verschillend is per verdichtingstemperatuur.

Bij de positieverdichting heeft de Freundl plaatverdichter verdicht tot een hoogte van 80 mm. De hoogte van de proefstukken blijken bij het meten van de hoogte ongeveer 81,5 – 82,5 mm te zijn. Om er zeker van te zijn dat dit het elastisch effect is en niet een fout in de Freundl plaatverdichter, is voor de volgende platen de hoogte in de bak voordat het asfalt erin zat gemeten en de hoogte in de bak na verdichten. Hieruit bleek dat de plaat wel tot 80 mm verdicht wordt en dus is er een elastisch effect (terugveereffect) van 1,5 – 2,5 mm na het verdichten te zien, waardoor de dichtheid minder wordt. De vraag is vervolgens of het elastisch effect na één dag wel is uitgewerkt of dat de asfaltplaat nog langer moet uitwerken voordat er geboord kan worden. Om dit te bepalen is er een plaat verdicht om die vervolgens een week uit te laten werken, waarbij elke dag de laagdikte is gemeten. Het resultaat van deze metingen is weergegeven in figuur 4.51.



Figuur 4.51: Resultaat elastisch effect

Hieruit blijkt dat het elastisch effect na 23 uur gelijk is aan het effect na 110 uur, dus wordt verondersteld dat na 23 uur de asfaltplaat is uitgewerkt. De platen zijn vervolgens wel tot 80 mm verdicht en niet tot bijv. tot 78 mm om tot een laagdikte van 80 mm te komen, zodat de omstandigheden zo veel mogelijk gelijk gehouden zijn voor alle te verdichten platen.

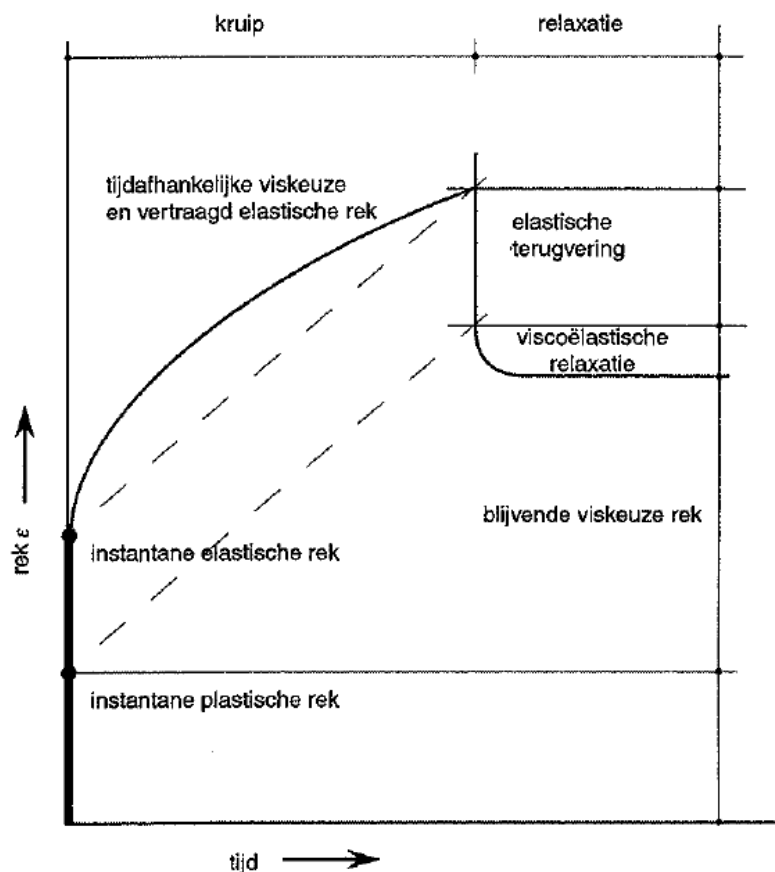
Vervolgens is het van belang of het elastisch effect verschillend is per verdichtingstemperatuur. Dit is geanalyseerd met de resultaten van de kracht gestuurde verdichting. De gemeten hoogte door de Freundl plaatverdichter, de hoogte van de kernen en het daaruit berekende elastische effect van de asfaltlaag is weergegeven in tabel 4.7.

Tabel 4.7: Elastisch effect per verdichtingstemperatuur

Plaat-nr.	Temperatuur verdichten (°C)	Hoogte Freundl (mm)	Hoogte kernen (mm)	Elastisch effect (mm)
19	138	81,9	83,2	1,3
20	140	81,9	83,2	1,3
21	88	82,5	83,2	0,7
22	89	82,7	83,4	0,7
23	169	81,5	83,1	1,6
24	166	81,3	83,0	1,7

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het elastisch effect bij hoge temperaturen groter is dan bij lage verdichtingstemperaturen en dus is de grootte van het elastisch effect afhankelijk van de verdichtingstemperatuur. Dit kan verklaard worden met behulp van het eerder beschreven reologische gedragsmodel van Krass (paragraaf 3.1.3) en de daarbij horende vervormings- en relaxatiekromme en de schets van het verdichtingsmechanisme bij gemodificeerde bitumen ontwikkeld door Ooms (bijlage 1.1).

De vervormings- en relaxatiekromme geeft de vervorming in de loop van de tijd weer en is weergegeven in figuur 4.52. De rek en relaxatie als functie van de tijd is dus afhankelijk van de instantane elastische rek, de instantane plastische rek, de visco-elastische rek, de visco-plastische rek, de elastische terugvering en de visco-elastische relaxatie. Het elastisch effect uit tabel 4.5 is dus eigenlijk de som van de elastische terugvering en de visco-elastische relaxatie.



Figuur 4.52: Vervormings- en relaxatiekromme asfalt (VBW-asfalt, 2000)

Stel, de kromme uit figuur 4.45 is de vervormings- en relaxatiekromme bij een verdichtingstemperatuur van 140 °C. De vervormings- en relaxatiekromme bij een verdichtingstemperatuur van 170 °C bereikt dan in een kortere tijd meer vervorming, maar heeft vervolgens ook een groter elastisch effect (elastische terugvering en visco-elastische relaxatie), zodat de uiteindelijke blijvende vervorming even

groot is. De vervormings- en relaxatiekromme bij 80 °C bereikt in een langere belastingstijd minder vervorming, maar heeft vervolgens een kleiner elastisch effect, en dus zal de uiteindelijke vervorming weer even groot zijn als bij 140 °C en 170 °C.

Het verdichtingsmechanisme ontwikkeld door Ooms (bijlage 1.1) laat alleen een elastisch effect zien (bouncing effect) bij gemodificeerde bitumen, maar uit de resultaten van dit onderzoek is te zien dat ook bij penetratiebitumen een elastisch effect te zien is. Het verdichtingsmechanisme ontwikkeld door Ooms laat een elastisch effect van ongeveer 1,5% verdichtingsgraad zien, bij een laagdikte van 80 mm is dit dus 1,2 mm, hetgeen overeenkomt met het gemeten elastisch effect bij een verdichtingstemperatuur van 140 °C.

Resumé; Het elastisch effect (elastische terugvering en visco-elastische relaxatie) is afhankelijk van de verdichtingstemperatuur; hoe hoger de verdichtingstemperatuur, des te groter het elastisch effect. Dit elastisch effect lijkt dus ook zichtbaar bij penetratiebitumen en niet alleen bij gemodificeerde bitumen.

2.2.5 Textuur

Onder de textuur van een wegdek wordt verstaan de oppervlakteruwheid van dat wegdek. In de textuur worden een drietal niveaus onderscheiden; microtextuur, macrottextuur en megatextuur. Onder microtextuur worden oneffenheden kleiner dan 0,5 mm verstaan, onder macrottextuur worden oneffenheden tussen 0,5 mm en 50 mm verstaan en onder megatextuur worden oneffenheden tussen 50 mm en 500 mm verstaan (VBW-asfalt, 2000).

In dit onderzoek is er onderzocht of er een verschil zit in de textuur bij de verschillende verdichtingstemperaturen. Dit is onderzocht met behulp van de berekende en bepaalde dichtheid van de proefstukken.

De dichtheid van een proefstuk kan worden berekend en bepaald. Het berekenen van de dichtheid is gedaan met formule 4.8. Het bepalen van de dichtheid is gedaan door middel van boven en onder water wegen en met behulp van de Wet van Archimedes (opwaartse kracht van een lichaam in een gas of vloeistof is gelijk aan het gewicht van het gas of de vloeistof zelf) kan de dichtheid worden bepaald met behulp van formule 4.9.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{F4.8}$$

Waarbij:

ρ = dichtheid in kg/m³

m = massa (droog) in kg

V = volume in m³

$$\rho = \frac{m_{droog}}{m_{nat} - m_{ow}} m_{water} \quad \text{F4.9}$$

Waarbij:

ρ = dichtheid in kg/m³

m_{droog} = massa droog in kg

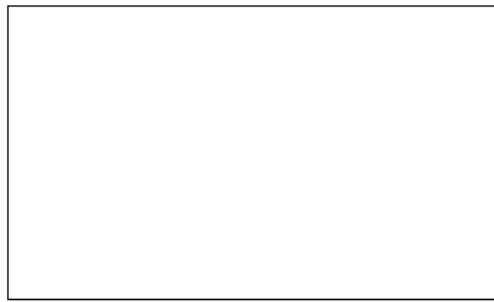
m_{nat} = massa nat in kg

m_{ow} = massa onder water in kg

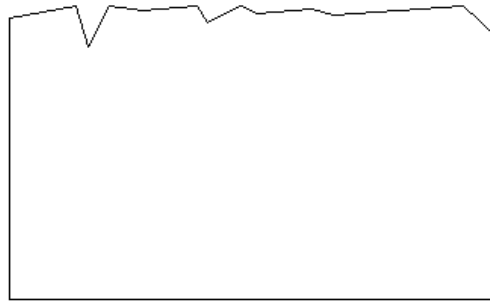
m_{water} = massa water in kg

Het verschil tussen de methoden is geïllustreerd met behulp van figuur 4.53. Bij het berekenen van de dichtheid wordt ervan uitgegaan dat het proefstuk perfect cilindrisch is (bij een doorsnede zoals in de figuur dus perfect rechthoekig), maar bij het bepalen van de dichtheid wordt er rekening gehouden met de textuur van het oppervlak. Het verschil tussen de berekende dichtheid en de bepaalde dichtheid is dus de 'open textuur' aan de onder-, boven- en zijkant van het proefstuk (waarbij wordt aangenomen dat het effect van opgesloten lucht bij beide manieren hetzelfde is).

Berekenen en bepalen dichtheid



Doorsnede perfecte cilinder
(dichtheid berekenen)



Doorsnede werkelijke asfaltkern
(dichtheid bepalen)

Figuur 4.53: Schematische bepaling dichtheid proefstukken

In tabel 4.8 en 4.9 zijn de berekende en bepaalde dichtheid voor respectievelijk de krachtgestuurde en positie gestuurde verdichting weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het verschil bij de hoge verdichtingstemperaturen (170°C) en de lage verdichtingstemperaturen (80 °C) een stuk groter is dan bij de verdichtingstemperaturen 149 °C en 98 °C. Bij de hoge en lage verdichtingstemperaturen is het verschil gemiddeld 27 kg/m³ en bij de verdichtingstemperaturen 98, 138 en 140 °C is het verschil gemiddeld 17 kg/m³. Dit betekent dat er 10 kg/m³ meer verschil is tussen de berekende en bepaalde dichtheid bij de hoge en lage verdichtingstemperaturen, dus er is 10 kg/m³ meer aan 'open textuur'. Omdat het verschil na het slijpen nihil te noemen is en omdat de onderkant zo goed als vlak is, betekent dit dat het grootste deel van deze 'open textuur' in de bovenste centimeter van het asfalt zit. Een verschil van 10 kg/m³ op een dichtheid van 2360 kg/m³ lijkt in eerste opzicht klein (minder dan 0,5%), maar omdat dit in de bovenste centimeter zit is dit toch een aanzienlijk aandeel. Het volgende voorbeeld illustreert dit:

Stel, de open textuur (een klein walsscheurtje bijvoorbeeld) heeft een diepte van 5 mm en een breedte van 0,2 mm en is 10 mm lang, dus heeft een totale oppervlakte van 10 mm³, dus 10⁻⁸ m³. Bij een dichtheid van 2360 kg/m³ zou deze opening dus een gewicht hebben van 2,4·10⁻⁵ kg. In 10 kg passen dan 423.729 kleine openingen van 10 mm, oftewel 4237 m aan kleine openingen van 5 mm diep bij 0,2 mm breed, en deze hebben dus een oppervlakte van 0,85 m². Bij een laagdikte van 80 mm heeft 1 m³ asfalt een oppervlakte van 12,5 m². Dus, in dit voorbeeld, zitten op een oppervlakte van 12,5 m² bij de hoge en lage verdichtingstemperaturen 0,85 m² meer 'open textuur', oftewel ongeveer 7% meer 'open textuur'.

Tabel 4.8: Dichtheden berekend en bepaald krachtverdichting

Plaat en temperatuur	Voor slijpen			Na slijpen		
	Dichtheid ber. (kg/m ³)	Dichtheid bep. (kg/m ³)	Vershil	Dichtheid ber. (kg/m ³)	Dichtheid bep. (kg/m ³)	Vershil
23 (169 °C)	2296	2329	33	2337	2340	3
24 (166 °C)	2321	2345	24	2355	2357	2
20 (140 °C)	2320	2334	14	2346	2349	3
19 (138 °C)	2317	2336	19	2349	2351	2
22 (89 °C)	2320	2346	26	2363	2370	7
21 (88 °C)	2315	2345	30	2365	2372	7

Tabel 4.9: Dichtheden berekend en bepaald positieverdichting

Plaat en temperatuur	Voor slijpen			Na slijpen		
	Dichtheid ber. (kg/m ³)	Dichtheid bep. (kg/m ³)	Verschil	Dichtheid ber. (kg/m ³)	Dichtheid bep. (kg/m ³)	Verschil
15 (170 °C)	2322	2351	29	2362	2368	6
4 (149 °C)	2325	2342	17	2354	2355	1
5 (98 °C)	2335	2351	16	2364	2367	3
12 (80 °C)	2353	2375	22	2389	2391	2

Hieruit kan geconcludeerd worden dat er meer 'open textuur' aanwezig is bij proefstukken verdicht bij hoge verdichtingstemperaturen (160 °C en hoger) en lage verdichtingstemperaturen (90 °C en lager) dan bij normale verdichtingstemperaturen (140 °C).

In de praktijk is het waarschijnlijk dat dit probleem nog groter is, omdat van de proefstukken in het laboratorium de boven- en onderkant afgeslepen zijn.

2.2.6 Conclusies laboratoriumonderzoek

In het laboratoriumonderzoek zijn STAB 0/16 mengsels zonder PR verdicht met de Freundl plaatverdichter (WSV-2008-KW50/500) volgens een tweetal procedures; positie gestuurd en kracht gestuurd. De asfaltplaten zijn verdicht bij 170 °C, 150 °C, 110°C en 80 °C. Vervolgens zijn de temperatuurverdeling in de asfaltplaat, de dichtheid en de mechanische eigenschappen geanalyseerd.

Voor beide verdichtingsprocedures kan geconcludeerd worden dat een homogene temperatuur binnen de asfaltplaat in de Freundl plaatverdichter behaald is. Verder is achteraf de spreiding van de belangrijkste variabelen (dichtheid, temperatuur en de eigenschappen van de bitumen) geanalyseerd. Aan de hand van deze analyse kan geconcludeerd worden dat de spreiding van de variabelen binnen de beoogde doelen vallen.

De resultaten van de positie- en krachtgestuurde verdichting zijn geanalyseerd op (1) de kracht en energie die nodig is om te verdichten en de daarbij horende verdichtingsprogressie, (2) de bereikte dichtheid en (3) de mechanische eigenschappen. Deze resultaten zijn beschreven aan de hand van de sub-onderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2.1:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie onder laboratoriumomstandigheden?

Uit de positie gestuurde verdichting kan geconcludeerd worden dat de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie toenemen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen minder viskeus zijn en er dus meer kracht nodig is om te verdichten. Bij verdichtingstemperaturen lager dan 100 °C is een onrealistisch grote kracht nodig om te verdichten en bij verdichtingstemperaturen hoger dan 150 °C dient er rekening mee worden gehouden dat er minder kracht nodig is om te verdichten en dus met een kleinere wals verdicht moet worden.

Uit de kracht gestuurde verdichting valt op dat bij het verdichten in de Freundl plaatverdichter een terugveereffect plaatsvindt. Het moment waarop dit terugveereffect tijdens verdichting plaatsvindt varieert per verdichtingstemperatuur; bij de hogere verdichtingstemperaturen vindt dit effect later plaats dan bij de lagere verdichtingstemperaturen. Verder wordt bij de kracht gestuurde verdichting

geconcludeerd dat het behalen van de beoogde eindlaagdikte naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt, moeilijker wordt.

Onderzoeksvraag 2.3:

Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen onder laboratoriumomstandigheden?

Er is geconcludeerd dat bij beide procedures het goed mogelijk is om bij alle verdichtingstemperaturen de streefdichtheid te behalen in het laboratorium. Bij de positie gestuurde verdichting wordt geconcludeerd dat structureel de kernen in het midden van de plaat, dus het midden van de walsrol een hogere dichtheid hebben dan de kernen aan de voor- en achterkant van de plaat, dus voor- en achterkant van de walsrol. Bij de kracht gestuurde verdichting is dit anders en is de rechterkant van de plaat, dus rechterkant van de walsrol, structureel lager in dichtheid.

Bij de kracht gestuurde verdichting bij lage temperaturen wordt het wel moeilijker, maar de streefdichtheid kan wel bereikt worden.

Tussen de twee verdichtingsprocedures valt op dat de positie gestuurde verdichting structureel tot hogere dichtheden leidt. Dit wil niet zeggen dat de positie gestuurde verdichting de werkelijkheid het best simuleert. In paragraaf 4.3 zijn de resultaten uit het laboratorium vergeleken met de resultaten van de praktijkmetingen, waarna verder is ingegaan op de relatie tussen het laboratorium en de praktijk en welke procedure op welke aspecten de werkelijkheid het best simuleert.

Onderzoeksvraag 3.1:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen onder laboratoriumomstandigheden?

Voor de kracht- en positie gestuurde verdichting zijn de mechanische eigenschappen geanalyseerd. Om de mechanische eigenschappen te bepalen is gekozen voor een slijp- en een triaxiaalproef om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden voor onderlagen (scheur- en spoorvorming) hiermee worden afgedekt (STAB), de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Bij de positie gestuurde verdichting lijkt er tussen de slijpsterkte en de verdichtingstemperatuur een parabolisch verband zichtbaar in de range van 170 °C tot 102 °C met een optimum qua slijpsterkte tussen de 149 °C en 158 °C. De slijpsterkte van 98 °C tot 80 °C hebben weer een hogere slijpsterkte. Een mogelijke verklaring is de hoge dichtheid die deze proefstukken hebben gehaald. De hoge verdichtingstemperaturen (166 °C en 170 °C) en de gemiddelde verdichtingstemperaturen (104 °C en 102 °C) hebben ongeveer 10% (ongeveer 0,3 MPa) minder slijpsterkte hebben dan de overige verdichtingstemperaturen. Bij de kracht gestuurde verdichting behalen de hogere verdichtingstemperaturen (166 °C en 169 °C) duidelijk een lagere slijpsterkte (8%).

Verder is bij beide procedures, ondanks dat de streefdichtheid is behaald, een groot verschil in scheurtaaiheid en scheursnelheid tussen de verdichtingstemperaturen te zien. Verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid. Tussen de scheursnelheid en scheurtaaiheid, en de dichtheid is bij beide procedures geen relatie gevonden; platen met een goede, boogde, dichtheid, maar verdicht bij een te hoge of lage temperatuur geven alsnog een lage scheurtaaiheid en hoge scheursnelheid, waaruit blijkt dat de verdichtingstemperatuur een belangrijke parameter is voor de scheurtaaiheid en scheursnelheid.

Bij de positie gestuurde verdichting is er geen relatie tussen de permanente deformatie (en dus weerstand tegen spoorvorming) en de dichtheid of verdichtingstemperatuur gevonden. Bij de kracht gestuurde verdichting is er wel een relatie tussen de permanente deformatie en de dichtheid en verdichtingstemperatuur gevonden; Relatief gezien kan de weerstand tegen spoorvorming tot 45% afnemen bij lagere dichtheden (tot 2330 kg/m³) bereikt bij een hoge verdichtingstemperatuur (170 °C). De vraag is of dit verschil komt door het verschil in dichtheid of door het verschil in verdichtingstemperatuur. Geconcludeerd kan alleen worden dat proefstukken verdicht met een relatief lagere verdichtingstem-

peratuur leidend tot een relatief hogere dichtheid een lagere permanente deformatie hebben dan proefstukken verdicht bij een hogere temperatuur leidend tot een lagere dichtheid, maar hoe groot het aandeel van iedere variabele (dichtheid en verdichtingstemperatuur) is, blijft onduidelijk. Logisch lijkt dat de dichtheid meer invloed heeft op de permanente deformatie dan de verdichtingstemperatuur, omdat bij een lagere dichtheid meer lucht wordt uitgedreven, waardoor de permanente deformatie groter is.

2.3 Praktijkmeting

2.3.1 Doel en concept praktijkmeting

De resultaten uit het laboratorium geven als temperatuur waarmee begonnen dient te worden met de verdichting, zodat de beoogde mechanische eigenschappen worden bereikt, 140°C tot 150°C. Bij de overige verdichtingstemperaturen (hoger en lager) worden niet beoogde ('slechtere') mechanische eigenschappen behaald, ondanks dat de beoogde (streef)dichtheid is behaald.

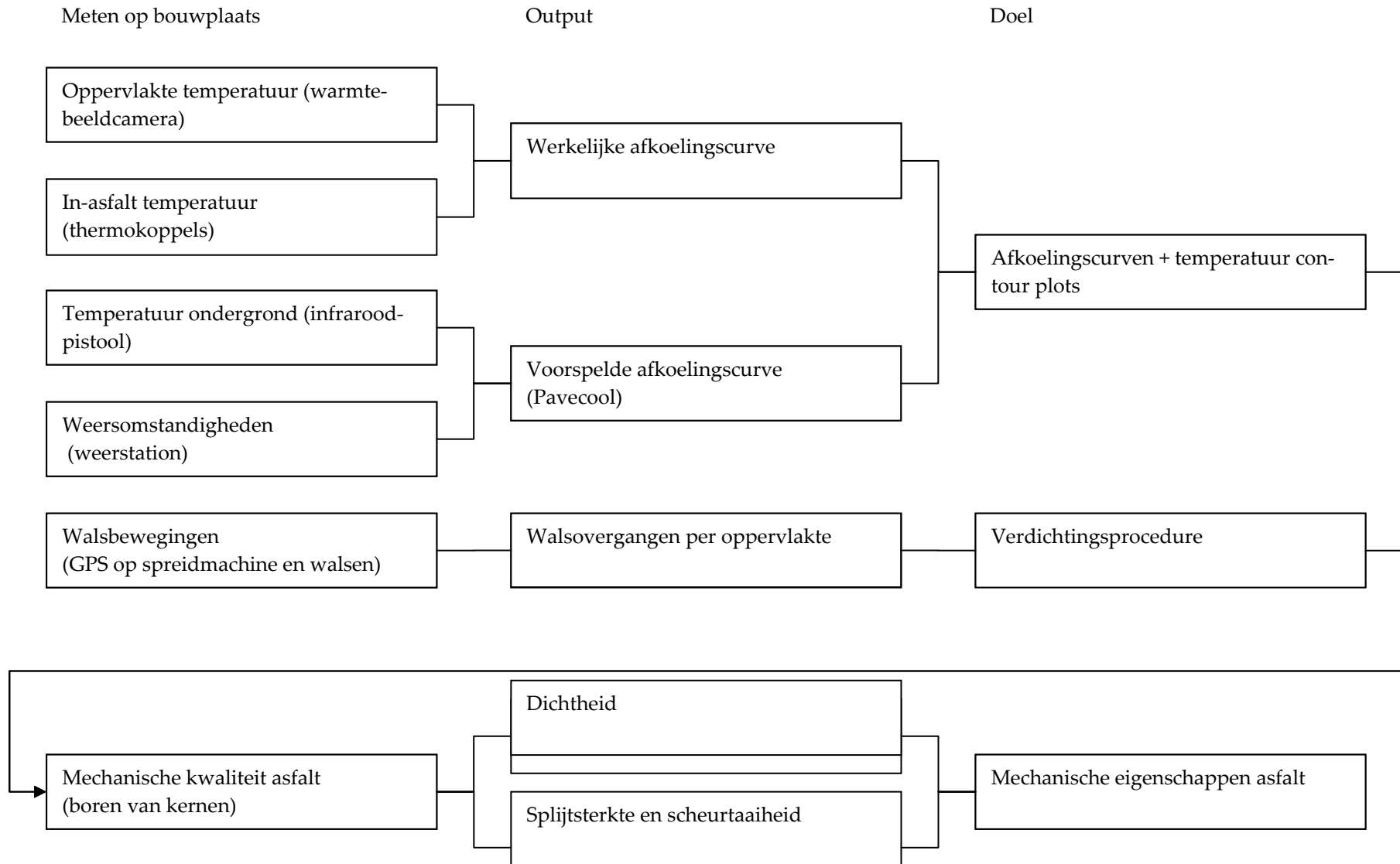
Nu is het de vraag in hoeverre de verdichting in het laboratorium de verdichting in de praktijk simuleert om de conclusies uit het laboratorium geldig te maken in de praktijk. Één van de contradicties van laboratoriumonderzoek maakt deze stap lastig; Binnen laboratoriumonderzoek is er een wil om de werkelijkheid te simuleren, maar de werkelijkheid is continu veranderlijk, terwijl in het laboratorium zoveel mogelijk variabelen gelijk worden gehouden. Door het simplificeren van de werkelijkheid zal desalniettemin een verificatie van de laboratoriumresultaten door middel van een studie in de praktijk plaatsvinden. Om tijdsredenen is ervoor gekozen om niet alle variabelen te verifiëren, maar een deel hiervan. In dit onderzoek is ervoor gekozen om te verifiëren of het effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen als fenomeen ook in de praktijk voorkomt. Er vindt dus geen verificatie plaats van aspecten als de precieze walskracht die uitgeoefend wordt, de vraag of de verschillende walsfasen (voorverdichting, hoofdverdichting en afwalsen) op een juiste wijze gesimuleerd worden, etc.

Het doel van deze praktijkcase is dus het toetsen van de resultaten uit het laboratorium, oftewel komt het fenomeen, dat asfaltmengsels verdicht bij verschillende verdichtingstemperaturen andere mechanische eigenschappen behalen ongeacht dat de beoogde dichtheid wordt behaald, in de praktijk ook voor.

Het concept is om een drietal werkvakken aan te brengen die verdicht zullen worden bij (1) de standaard temperatuur van 150-160 °C, (2) een kritische temperatuur waarmee in de praktijk nog wel eens verdicht wordt (130°C) en een erg lage temperatuur om te verdichten (100°C). Per temperatuurgebied (werkvak) zullen 14 asfaltkernen geboord moeten worden om een goed inzicht te krijgen in de mechanische eigenschappen. Vervolgens zal van de geboorde kernen in het laboratorium de dichtheid worden bepaald en beproefd worden met een splijtproef t.b.v. de scheurweerstand. De keuze voor de splijtproef is tweërlei; ten eerste omdat in de labresultaten de verschillen bij de scheurtaaiheid het duidelijkst zijn en ten tweede om de praktische reden dat het weinig tijd kost.

In figuur 4.54 zijn de te meten variabelen van de praktijkstudie, de bijbehorende manier van meten (tussen haakjes), de output van de metingen en het doel van de metingen weergegeven. Het in beeld brengen van de temperatuur is gedaan met een warmtebeeldcamera voor de oppervlaktetemperatuur en de temperatuur van de ondergrond, en de verticale temperatuurverdeling over de asfaltlaag is gemeten met thermokoppels. Het in beeld brengen van de walsbewegingen is gedaan door GPS-apparatuur te bevestigen op de walsen, zodat het aantal walovergangen per locatie bepaald kunnen worden. De weersomstandigheden zijn vastgelegd door een weerstation. De warmtebeeldcamera, de GPS-apparatuur en het weerstation zijn verstrekt door ASPARi. Vooraf is gekozen om op representatieve plaatsen te boren op basis van de temperatuur en het aantal walovergangen. Van de kernen is de dichtheid bepaald door middel van onder en boven water wegen en de splijsterkte en scheurtaaiheid met behulp van de splijtproef om inzicht te krijgen in de mechanische eigenschappen.

Aanpak praktijkmeting



Figuur 4.54: Te meten variabelen, output en doel

Bij de uitvoering van de metingen in de praktijk spelen een aantal problemen. Een moeilijkheid binnen de praktijkmeting is dat in het laboratorium STAB 0/16 mengsels zonder PR zijn beproefd (om zo min mogelijk variabiliteit in het mengsel te krijgen) en dat in de praktijk deze mengsels altijd met PR worden gemaakt. Voor deze praktijkstudie is daarom speciaal een STAB 0/16 mengsel zonder PR aangebracht (AC 16 base 40/60 zonder PR).

Ook is het belangrijk om een STAB-laag van minimaal 70 mm te onderzoeken, zodat de kernen geslepen kunnen worden en ook de beoogde hoogte van het proefstuk voor de mechanische proeven behaald kan worden. Bij de praktijkmeting is een STAB 0/16 mengsel met een laagdikte van 80 mm onderzocht, rekening houdende met enige variabiliteit in de laagdikte, zodat na het slijpen voldoende laagdikte overblijft om een slijtproef te doen. Normaliter wordt een STAB 0/16 mengsel aangelegd tot 50 a 60 mm en bij grotere diktes wordt veelal een STAB 0/22 gebruikt. Om toch voldoende dikte te krijgen om mechanische proeven te kunnen doen en te kunnen vergelijken met de resultaten uit het laboratorium is in een vak voor STAB 0/22 een STAB 0/16 van 80 mm aangebracht.

Daarnaast is het vergelijken van de temperatuur uit het laboratorium en de temperatuur in de praktijk erg moeilijk, omdat de temperatuur in het laboratorium relatief gelijk blijft, maar in de praktijk koelt de materiaalt temperatuur af in de loop van de tijd. Ook vinden er verschillende verdichtingsfasen plaats, nl. voorverdichting door de balk, een soort hoofdverdichting en het afwalsen. Daarom zal het moeilijk zijn om een exact temperatuurvenster te bepalen, maar het doel is dan ook niet om dit temperatuurvenster heel nauwkeurig te bepalen, maar het doel is om te onderzoeken of het fenomeen (dat een mengsel wel de beoogde dichtheid behaald, maar doordat het bij een te hoge of lage temperatuur is verdicht slechtere mechanische eigenschappen krijgt) in de praktijk ook optreedt. Wegens de problemen van de afkoeling in de loop van de tijd in de praktijk en de verschillende verdichtingsfasen (voorverdichting, hoofdverdichting en nawalsen) zal het onderzoek worden versimpeld door het gehele verdichtingsproces te beschouwen en geen onderscheid te maken in de verschillende fasen en te kijken naar de verdichtingstemperatuur bij aanvang van het verdichtingsproces.

2.3.2 Beschrijving en aanpak praktijkmeting

De praktijkmeting betreft een werk in Dirkshorn (zie figuur 4.55). Bij een loods dient er ongeveer 5000 m² aan omliggend terrein te worden geasfalteerd. Het betreft een onderlaag van 80 mm STAB 0/22 en een deklaag. Achter de loods is er een terrein van ongeveer 19 m breed en 80 m lang waarop 4 stroken worden aangebracht, 3 stroken van 4,5 m (voor dit onderzoek) en 1 strook van 5,5 m om het vak af te werken. Beoogd wordt dat het eerste vak verdicht zal worden bij 150 °C, het tweede vak bij 130 °C en het derde vak bij 100 °C. Er zal dus ongeveer 90 m³ STAB 0/16 zonder PR aangeleverd moeten worden, ongeveer 230 ton, dus ongeveer 8 vrachtauto's met 30 ton.

De ondergrond van de aan te brengen STAB-laag is 350 mm betongranulaat dat er ongeveer drie maanden ligt, en is dus goed verdicht. Onder het betongranulaat ligt een harde, zandige grondlaag.



Figuur 4.55: Werkvlak

In figuur 4.55 is het werkvak in Dirkshorn weergegeven. Aan de ene kant staat de loods en aan de andere kant liggen stelcon-platen. In het midden van het werkvak zijn er kolken aangebracht waar het asfalt naar afwatert.

Het concept van het aanbrengen van het asfalt is als volgt; De aanvoertemperatuur van het asfalt is ongeveer 165 °C. Na het voorverdichten (door de balk van de spreidmachine) wordt de eerste 100 meter vrijwel direct verdicht (dus bij ongeveer 150 °C), dus de standaard werkprocedure. Bij de 2^e 100 meter wordt, na het voorverdichten door de balk, gewacht tot de temperatuur gezakt is tot 130 °C om vervolgens te gaan walsen en bij de 3^e 100 meter wordt gewacht tot de temperatuur 100°C is. Het doel is om alle vakken te verdichten tot de boogde streefdichtheid.

Van het asfaltmengsel is bij de asfalmolen een extractie gemaakt. Hieruit is gebleken dat het asfaltmengsel een stuk grover is dan het mengsel dat in het laboratorium is beproefd. Hierdoor is het moeilijk om de resultaten van de praktijkmeting direct te kunnen vergelijken met de resultaten uit het laboratorium.

Daarnaast heeft het de nacht voor de uitvoering en tijdens de uitvoering enorm geregend, dus de weersomstandigheden waren zeer slecht. De ondergrond was volledig verzadigd en er waren plassen, waardoor het klankbord verschillend was. Ook hierdoor zijn de resultaten van de praktijkmeting moeilijk te vergelijken met de resultaten uit het laboratorium.

2.3.3 Resultaten praktijkmeting

2.3.3.1 Temperatuur

Tijdens het gehele verwerkingsproces is de temperatuur van het asfaltmengsel gemeten; bij de asfalmolen, de temperatuur van het asfaltmengsel wanneer de vrachtwagen het asfaltmengsel in de hopper lost, de temperatuur van het asfalt achter de spreidmachine en in het midden van de werkvakken zijn thermokoppels geplaatst om de afkoeling in de loop van de tijd te meten. Deze metingen zijn achtereenvolgens beschouwd.

Het asfaltmengsel bij de asfalmolen is gemengd met een zogenaamd discontinue systeem, oftewel een chargemenger. De totale hoeveelheid asfaltmengsel is gemengd in 69 charges met een gemiddelde temperatuur van 161 °C.

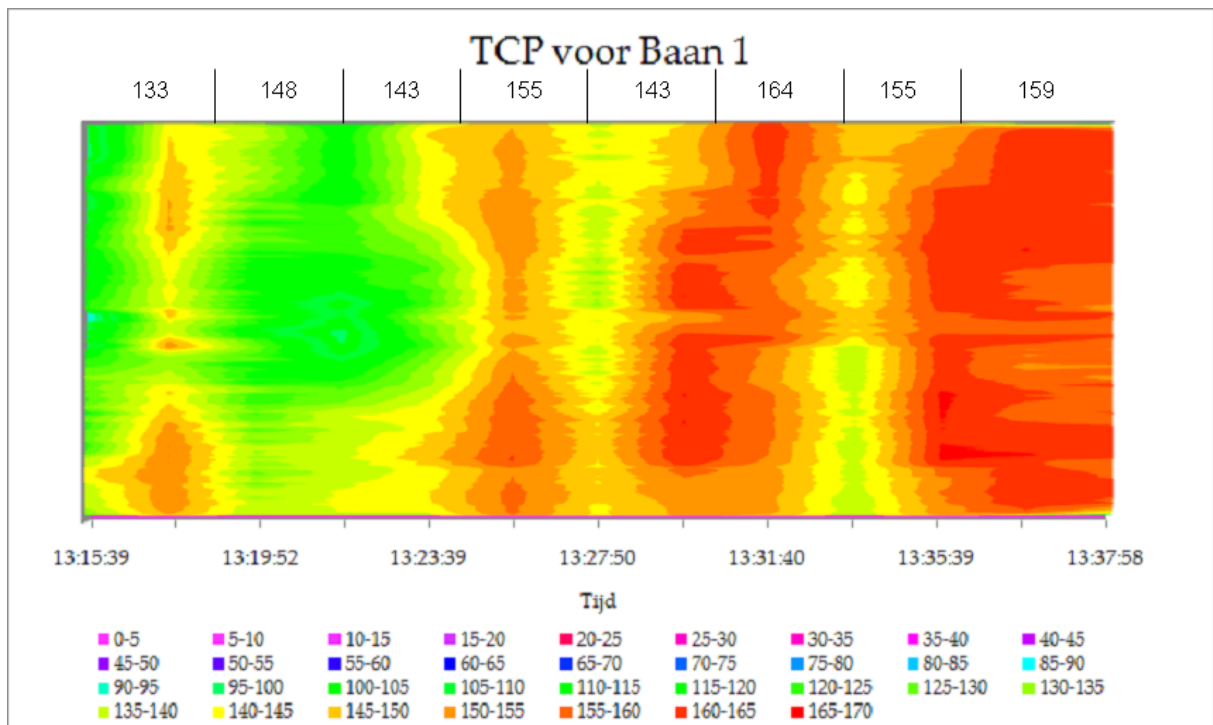
Vervolgens is het asfaltmengsel getransporteerd naar de bouwplaats. De afstand tussen de asfalmolen en de bouwplaats is 8 km en ongeveer 10-15 minuten rijden. De temperatuur van het asfaltmengsel is gemeten op het moment dat de vrachtwagen het mengsel in de hopper lost gemeten met een infraroodpistool. De gemiddelde temperatuur van vak 1 is 165 °C, de gemiddelde temperatuur van vak 2 is 157 °C en de gemiddelde temperatuur van vak 3 is 156 °C wanneer de vrachtwagen het asfaltmengsel lost in de hopper.

Vervolgens is de temperatuur achter de spreidmachine gemeten met een Linescanner (zie figuur 4.56). Het resultaat is een overzicht van de oppervlaktetemperatuur over de gehele lengte van de verschillende werkvakken in de vorm van thermografiebeelden. Daarnaast zijn over elke 10 strekkende meters een drietal temperatuurmetingen uitgevoerd met een digitale thermometer om inzicht te krijgen in de gemiddelde temperatuur over de verticale richting van het asfalt.



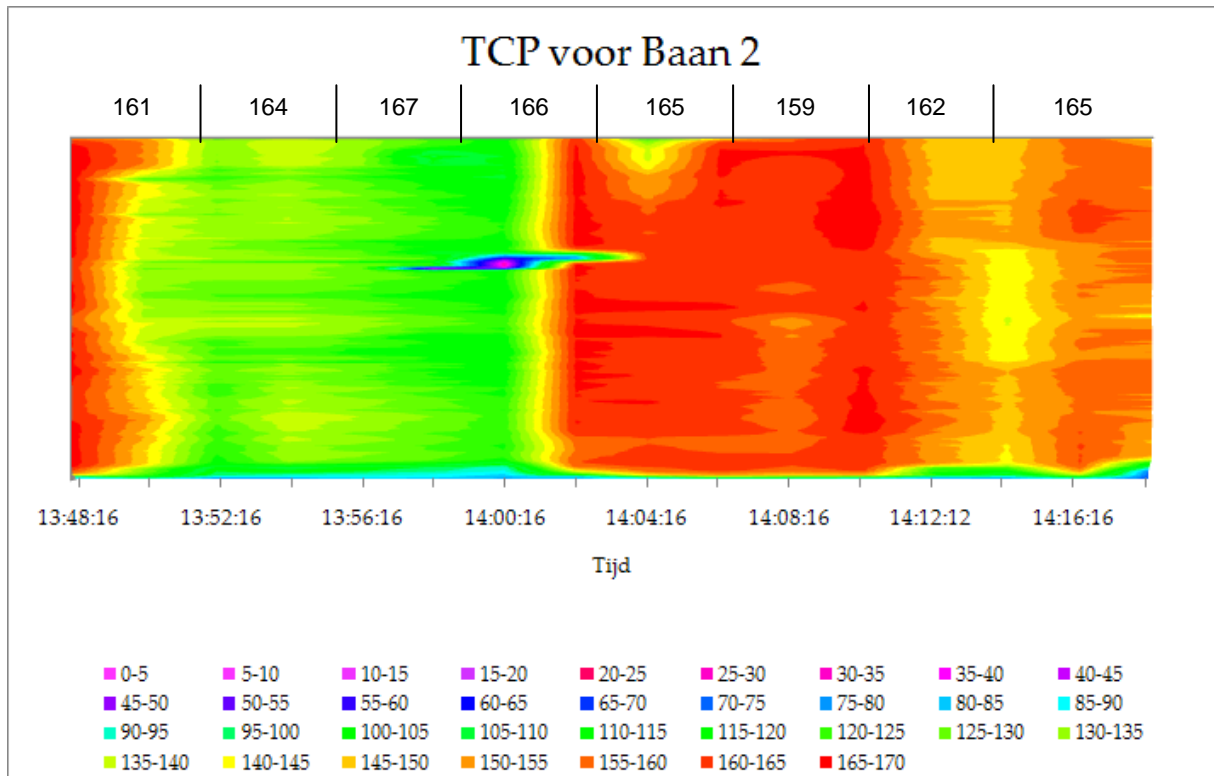
Figuur 4.56: Linescanner praktijkmeting

In figuur 4.57 is de Temperatuur Contour Plot (TCP) voor baan 1 weergegeven. Boven de TCP is de gemiddelde gemeten temperatuur met de digitale thermometer weergegeven. Hierbij valt op dat de eerste vrachten vrij koud zijn geweest (een gemiddelde temperatuur van 141 °C en een oppervlakte-temperatuur van ongeveer 120 °C). Daarnaast zijn er twee stopplaatsen geweest (om 13:27 uur en 13:33 uur), waarbij de temperatuur is afgekoeld tot ongeveer 135 °C. Verder ligt de temperatuur rond de 160-165 °C.



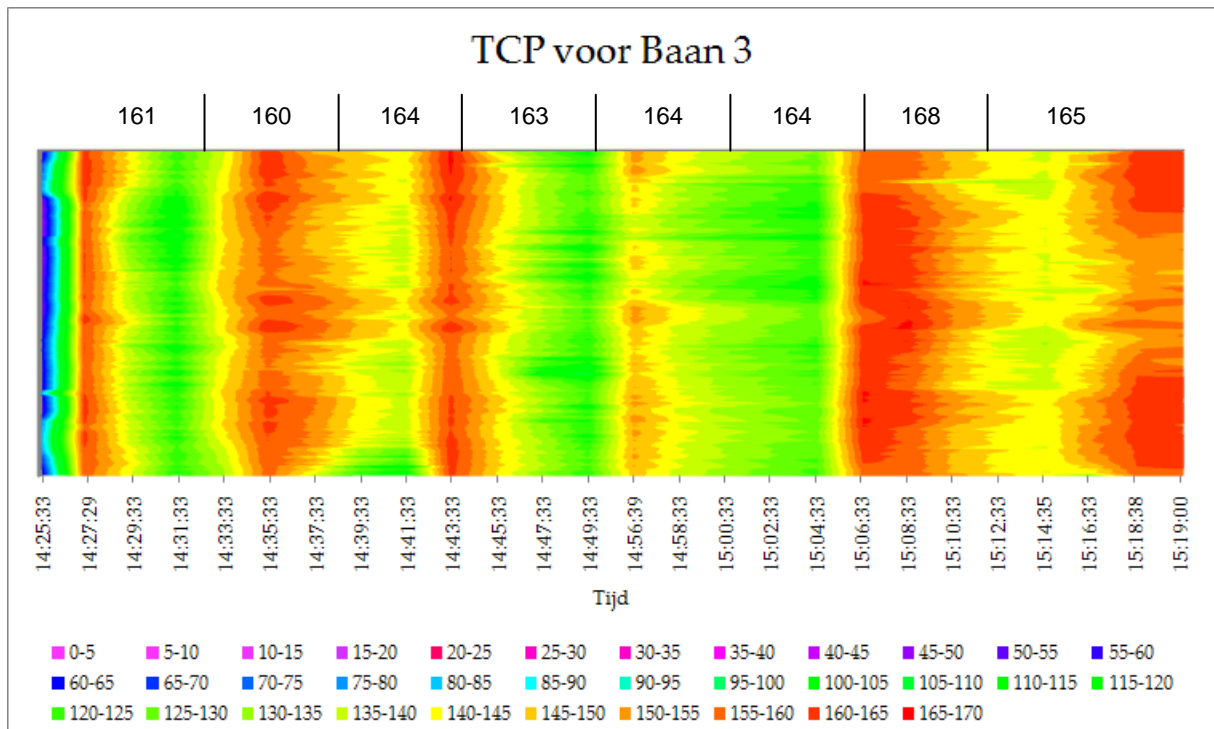
Figuur 4.57: Temperatuur contour plot baan 1 praktijkmeting

In figuur 4.58 is de TCP voor baan 2 weergegeven. Hierbij valt op dat tussen 13:50 uur en 14:02 uur de oppervlaktetemperatuur is gezakt tot ongeveer 130 °C, terwijl de gemiddelde temperatuur gemeten met de digitale thermometer 164 °C is. De oorzaak hiervan is een hevige regenbui, waardoor de oppervlaktetemperatuur van het asfalt sterk is afgenomen. Daarnaast is er 14:14 uur nog een stopplaats geweest waarbij de temperatuur is gezakt tot ongeveer 140 °C. Verder ligt de temperatuur rond de 155-165 °C.



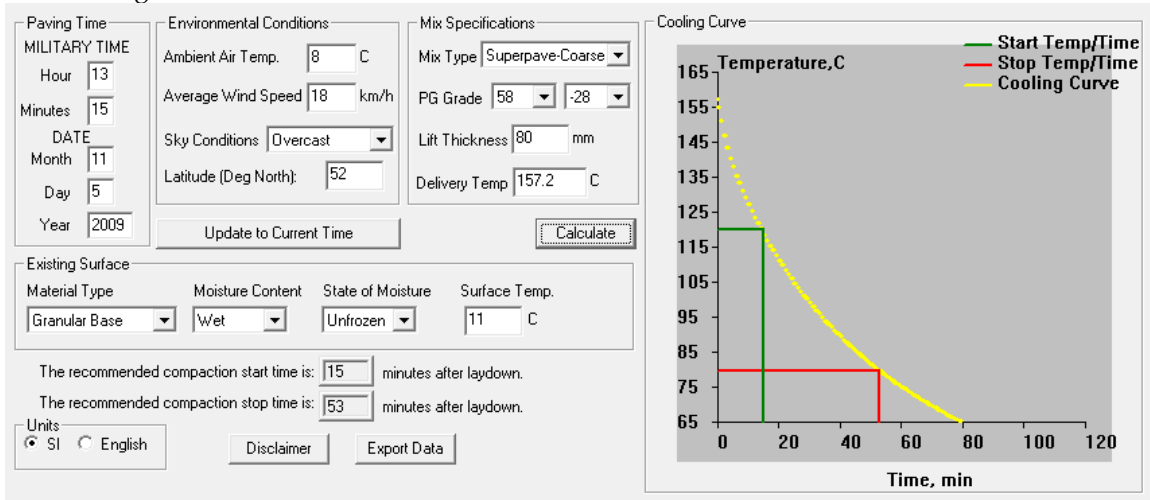
Figuur 4.58: Temperatuur contour plot baan 2 praktijkmeting

In figuur 4.59 is de TCP voor baan weergegeven. Tijdens deze baan is het verwerkingsproces vaak stil komen te liggen, hetgeen te zien is aan de zes stopplaatsen, waarbij de temperatuur gedaald is tot ongeveer 135 °C. Tussen de stopplaatsen is de temperatuur ongeveer 160-170 °C.



Figuur 4.59: Temperatuur contour plot baan 3 praktijkmeting

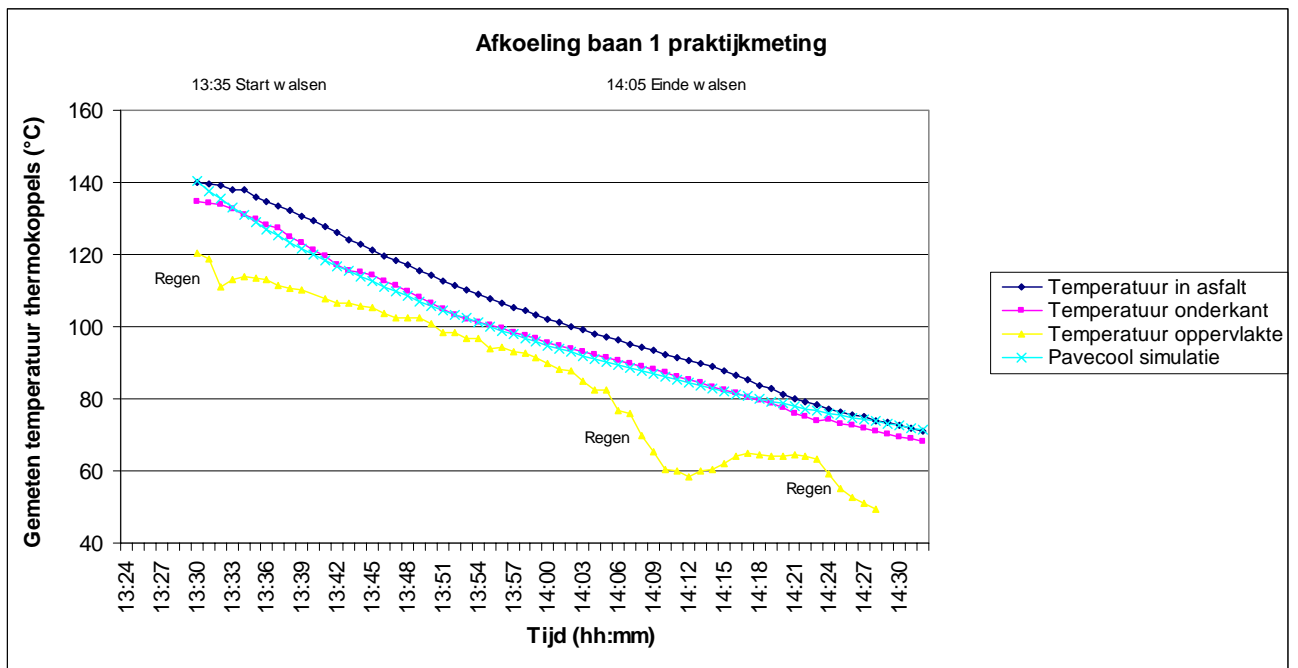
Vervolgens zijn in het midden van de werkvakken thermokoppels aangebracht om de afkoeling in de verticale richting van het asfalt in de loop van de tijd te meten. Deze resultaten zijn vergeleken met de voorspelde afkoeling van het asfaltmengsel door het programma Pavecool. De invoerparameters voor Pavecool zijn weergegeven in figuur 4.60. De buitentemperatuur was 8 °C, de windsnelheid 18 km/h en temperatuur van de ondergrond was 11 °C. Verder zijn de invoerparameters aangepast aan het STAB-mengsel.



Figuur 4.60: Invoerparameters Pavecool praktijkmeting

In figuur 4.61 is de afkoeling van de in-asfalt temperatuur, de temperatuur van onderkant van de asfaltlaag, de oppervlaktetemperatuur en de Pavecool simulatie van baan 1 weergegeven. Hierbij vallen de regenbuien van 13:31 uur, 14:07 uur en 14:24 uur op, waarbij de oppervlaktetemperatuur snel daalt en de in-asfalttemperatuur en de temperatuur van de onderkant van de asfaltlaag volgens verwachting afkoelen. De Pavecool simulatie komt het meest overeen met de afkoeling van de temperatuur van de onderkant van de asfaltlaag.

Om 13:35 uur is er begonnen met walsen bij een gemiddelde temperatuur over de verticale richting van de asfaltlaag van 127 °C en er is gestopt met walsen om 14:05 uur bij een gemiddelde temperatuur van 90 °C. De walstijd is dus 30 minuten geweest in een temperatuurgebied van 127 °C tot 90 °C.



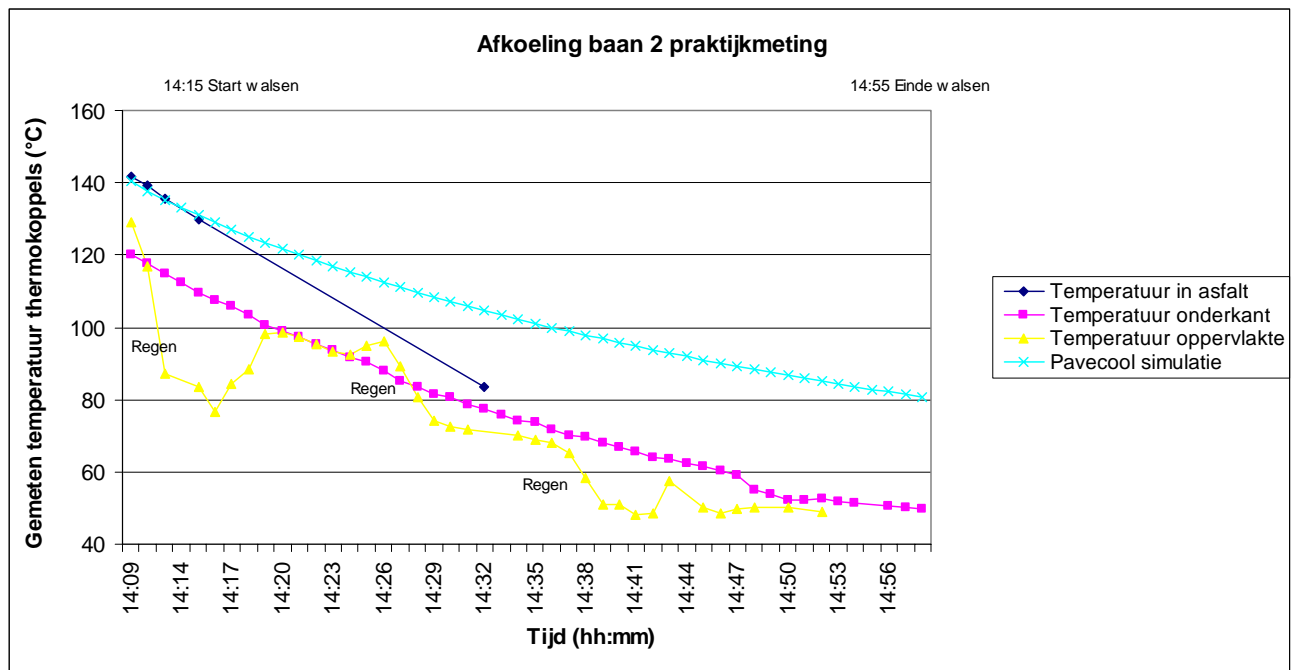
Figuur 4.61: Afkoeling baan 1 praktijkmeting

In figuur 4.62 is de afkoeling van de in-asfalt temperatuur, de temperatuur van onderkant van de asfaltlaag, de oppervlaktetemperatuur en de Pavecool simulatie van baan 2 weergegeven. Hierbij is te zien dat de thermokoppel in het midden van de asfaltlaag na een aantal minuten is uitgevallen en na 15 minuten weer één meting heeft doorgegeven en verder geen metingen heeft gedaan.

Verder vallen de regenbuien van 14:10 uur, 14:27 uur en 14:37 uur op, waarbij de oppervlaktetemperatuur snel daalt en de temperatuur van de onderkant van de asfaltlaag volgens verwachting afkoelen.

De Pavecool simulatie voorspelt een stuk hogere temperatuur dan de werkelijke gemeten temperatuur. De verwachte oorzaak hiervan is de regen en de plassen water op baan 2.

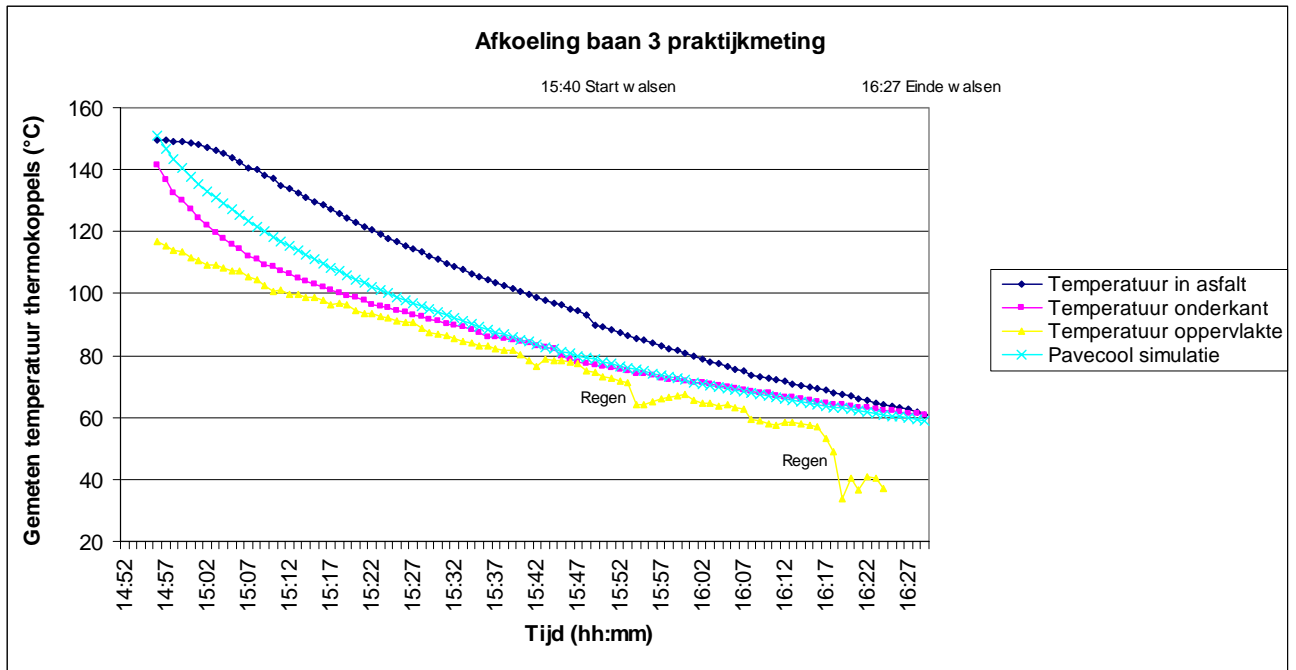
Om 14:15 uur is er begonnen met walsen bij een gemiddelde temperatuur over de verticale richting van de asfaltlaag van 108 °C en er is gestopt met walsen om 14:55 uur bij een gemiddelde temperatuur van 83 °C. De walstijd is dus 40 minuten geweest in een temperatuurgebied van 108 °C tot 83 °C.



Figuur 4.62: Afkoeling baan 2 praktijkmeting

In figuur 4.63 is de afkoeling van de in-asfalt temperatuur, de temperatuur van onderkant van de asfaltlaag, de oppervlaktetemperatuur en de Pavecool simulatie van baan 3 weergegeven. Hierbij vallen de regenbuien van 15:53 uur en 16:17 uur op, waarbij de oppervlaktetemperatuur snel daalt en de in-asfalttemperatuur en de temperatuur van de onderkant van de asfaltlaag volgens verwachting afkoelen. De Pavecool simulatie komt, net zoals bij baan 1, het meest overeen met de afkoeling van de temperatuur van de onderkant van de asfaltlaag.

Om 15:40 uur is er begonnen met walsen bij een gemiddelde temperatuur over de verticale richting van de asfaltlaag van 89 °C en er is gestopt met walsen om 16:27 uur bij een gemiddelde temperatuur van 54 °C. De walstijd is dus 50 minuten geweest in een temperatuurgebied van 89 °C tot 54 °C.



Figuur 4.63: Afkoeling baan 3 praktijkmeting

2.3.3.2 Verdichting

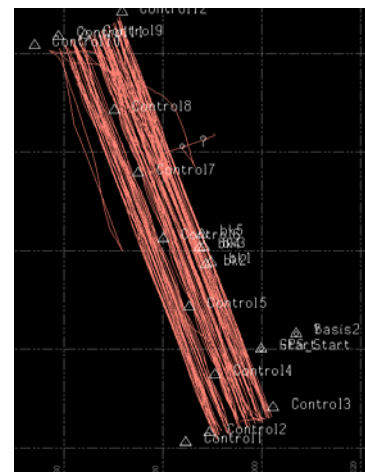
Voor wat betreft de verdichting zijn er een tweetal aspecten geanalyseerd; de verdichtingsprocedure en de verdichtingsprogressie. Deze twee aspecten zijn achtereenvolgens beschouwd.

Voor het verdichten van het asfalt is in de praktijkmeting bij Dirkshorn een combiwals (banden aan de voorkant en statische walsrol aan de achterkant) en een kleine tandemwals gebruikt. Het principe is dat de combiwals de 'bulkverdichting' doet en dat de kleine tandemwals de naden walst en tussen de kolken walst. De combiwals heeft een gewicht van 10.400 kg, een last van 26,3 kg/cm en de banden hebben een walsrolkarakteristiek (volgens VBW-asfalt, formule 2.2) van 25,2 en de statische walsrol heeft een walsrolkarakteristiek van 20,6. De kleine tandemwals heeft een gewicht van 2900 kg, een last van 10,5 kg/cm en een walsrolkarakteristiek van 22,8.

In figuur 4.64 is een foto van de combiwals weergegeven en in figuur 4.65 is de walsintensiteit van de combiwals weergegeven. In figuur 4.65 is links baan 3, daartussen kolken (driehoekjes) en het midden en rechts zijn respectievelijk baan 2 en 1. Hieruit kan geconcludeerd worden dat baan 3 (links) minder vaak gewalst is dan baan 2 en 1. De oorzaak hiervan is dat er geen verdichtingsprogressie meer te zien was tijdens de uitvoering, waardoor gestopt is met walsen.



Figuur 4.64: Combiwals

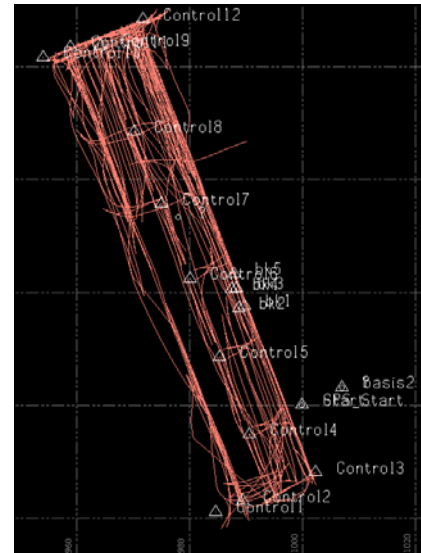


Figuur 4.65: Walsintensiteit combiwals

In figuur 4.66 is een foto van de kleine tandemwals weergegeven en in figuur 4.67 is de walsintensiteit van de kleine tandemwals weergegeven. Wederom is in figuur 4.67 links baan 3, daartussen kolken (driehoekjes) en het midden en rechts zijn respectievelijk baan 2 en 1. In figuur 4.67 is ook duidelijk te zien dat de combiwals met name de naden en tussen de kolken walst. Verder valt op dat baan 3 (links) bijna niet gewalst is, omdat er totaal geen verdichtingsprogressie meer bij de lage verdichtingstemperatuur te zien was bij de uitvoering.



Figuur 4.66: Kleine tandemwals

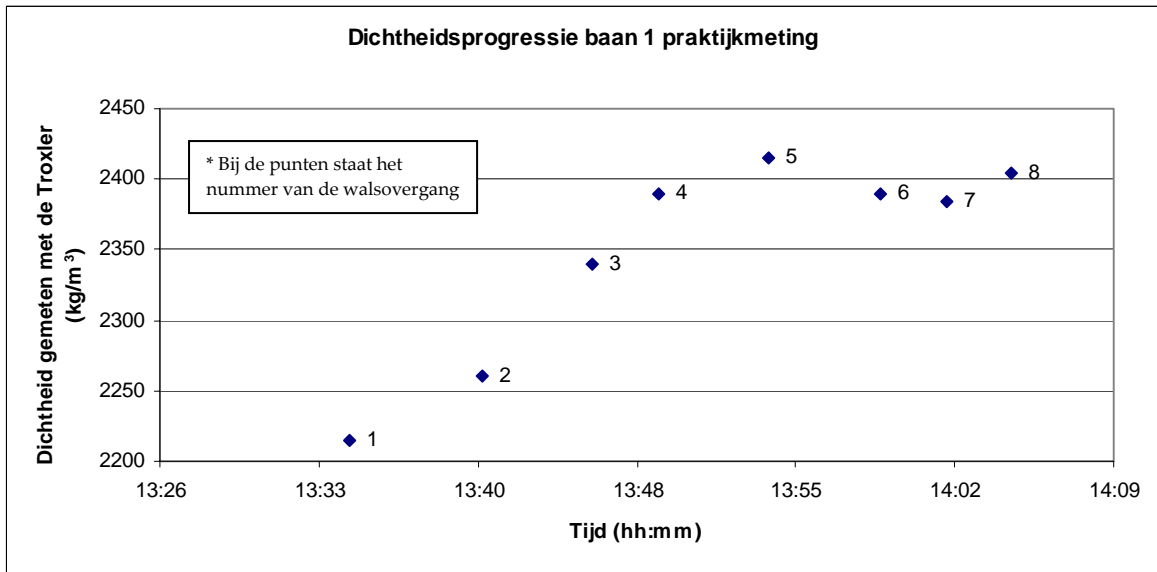


Figuur 4.67: Walsintensiteit kleine tandemwals

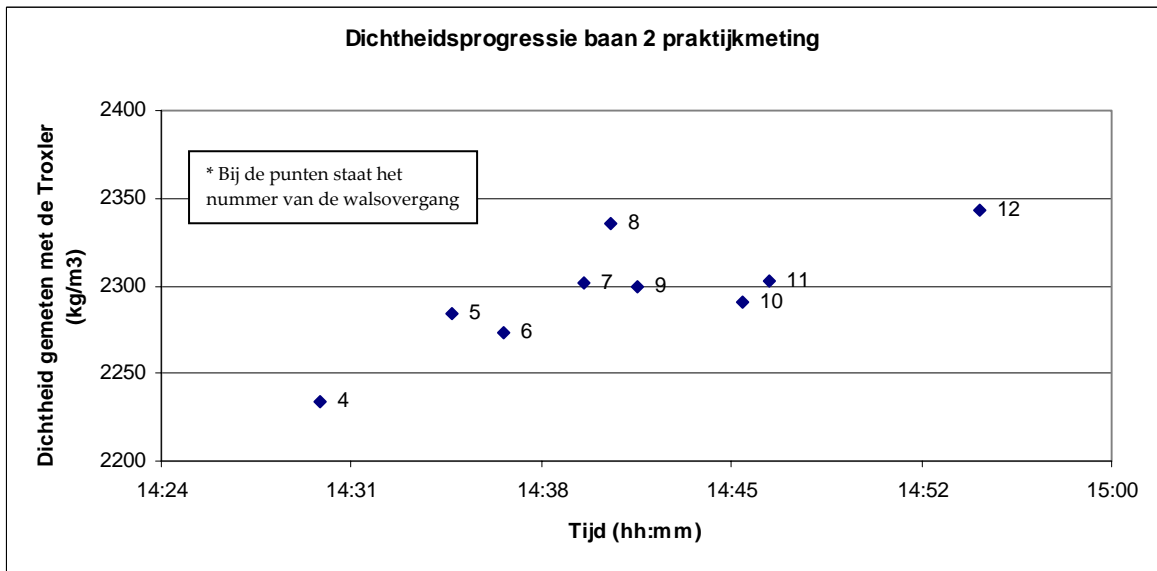
Vervolgens is de verdichtingsprogressie geanalyseerd. Vlakbij de thermokoppels is de verdichtingsprogressie na elke walsovergang gemeten met behulp van een nucleaire dichtheidsmeting (troxler). De resultaten van de nucleaire dichtheidmetingen met de Troxler van baan 1, 2 en 3 zijn respectievelijk weergegeven in figuur 4.68, 4.69 en 4.70. Op de X-as staat de tijd, op de Y-as de nucleair gemeten dichtheid en bij de punten staat het nummer van de walsovergang. Van baan 2 is de dichtheid van de eerste 3 walsovergangen niet gemeten.

Wat opvalt in de drie figuren is dat de dichtheid eerst toeneemt, daarna weer afneemt en uiteindelijk weer toeneemt. De verwachte oorzaak hiervan is het elastisch effect van asfalt; wanneer het asfalt terugveert, neemt de dichtheid af.

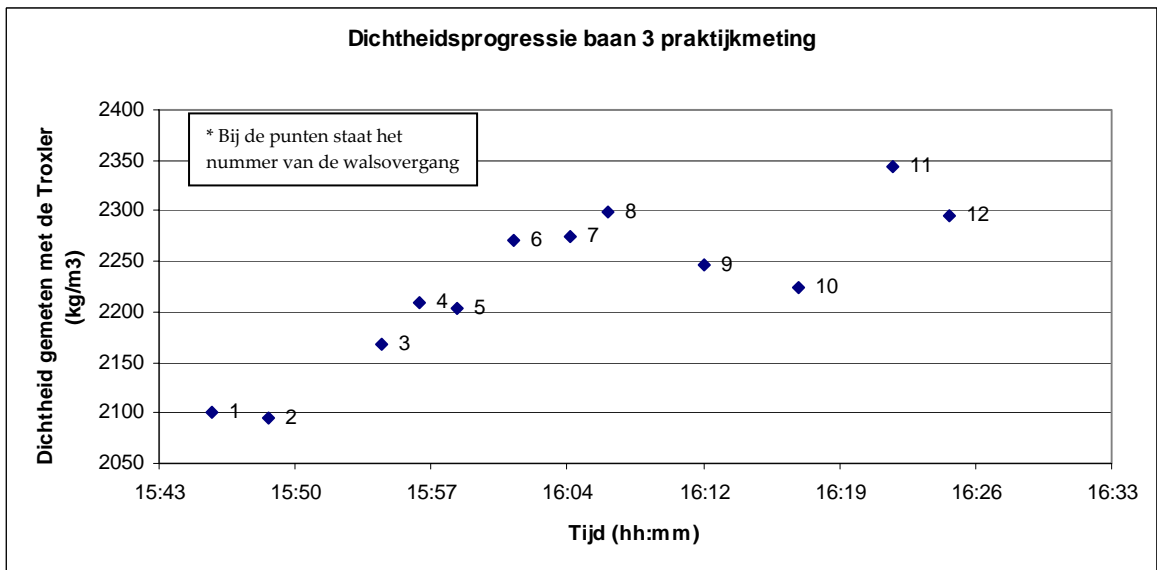
Verder valt op dat de dichtheid van baan 1 tot ongeveer 2400 kg/m^3 komt, de dichtheid van baan 2 tot ongeveer 2340 kg/m^3 komt en de dichtheid van baan 3 tot ongeveer 2310 kg/m^3 komt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de beoogde dichtheid (2339 kg/m^3) behaald kan worden. Bij baan 1 is na 3 walsovergangen de streefdichtheid al behaald, bij baan 2 na 12 walsovergangen en bij baan 3 wordt met moeite een dichtheid van 2300 kg/m^3 behaald, hetgeen nog net binnen de marges valt.



Figuur 4.68: Verdichtingsprogressie baan 1 praktijkmeting



Figuur 4.69: Verdichtingsprogressie baan 2 praktijkmeting



Figuur 4.70: Verdichtingsprogressie baan 3 praktijkmeting

2.3.3.3 Dichtheid

De volgende ochtend na de uitvoering zijn er asfaltkernen geboord. Per baan zijn er zeven series van 2 kernen vlakbij elkaar (dus gepaard) geboord. Er is in het midden van de banen (in lengte en in breedte) geboord om een representatieve meting te doen en geen effecten van de zijkant te hebben. In figuur 4.71 is weergegeven waar de asfaltkernen zijn geboord.

Boorprocedure

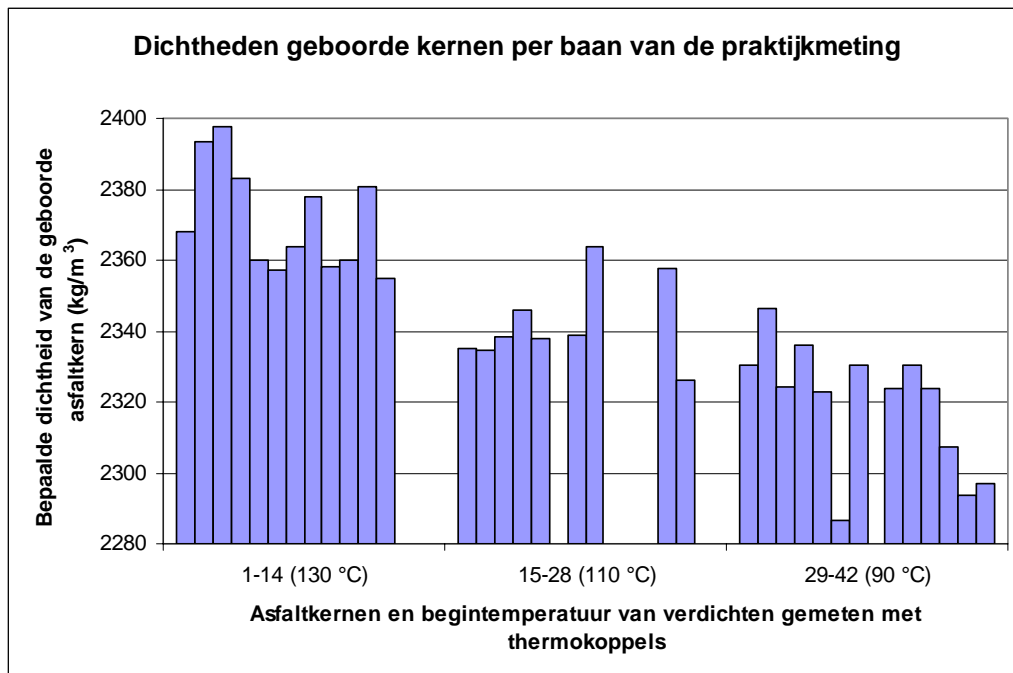
Vak 1: 130 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 2: 110 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 3: 90 C (4,5m)	:	:	:	:	:	:	:
Vak 4: Afwerkvak (5,5m)	niet gemeten						

Legenda:

- Kolken
- Boorplaats

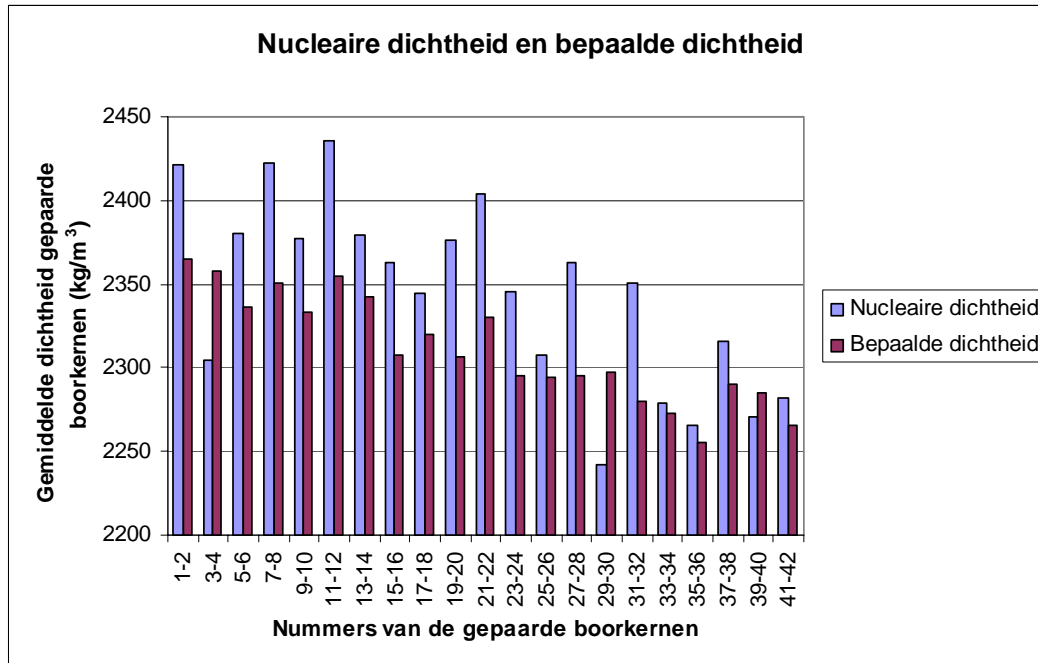
Figuur 4.71: Plaatsing boren asfaltkernen praktijkmeting

In figuur 4.72 zijn de bepaalde dichtheden van de kernen uit figuur 4.64 na het slijpen weergegeven. Op de X-as staat het nummer van de baan en de gemeten temperatuur met de thermokoppels aan het begin van de hoofdverdichting (walsen). Een aantal kernen zijn uit de analyse gehaald, omdat onvoldoende laagdikte was behaald om te slijpen en de beoogde laagdikte te behalen voor de mechanische proef (splijtproef). In figuur 4.65 is een duidelijke trend te zien; des te lager de temperatuur bij aanvang van verdichten, des te moeilijker het is om de streefdichtheid (2339 kg/m^3) te behalen. Drie kernen uit baan 3 vallen daarmee buiten de marges van de dichtheid (plus of min 30 kg/m^3 ten opzichte van de streefdichtheid).



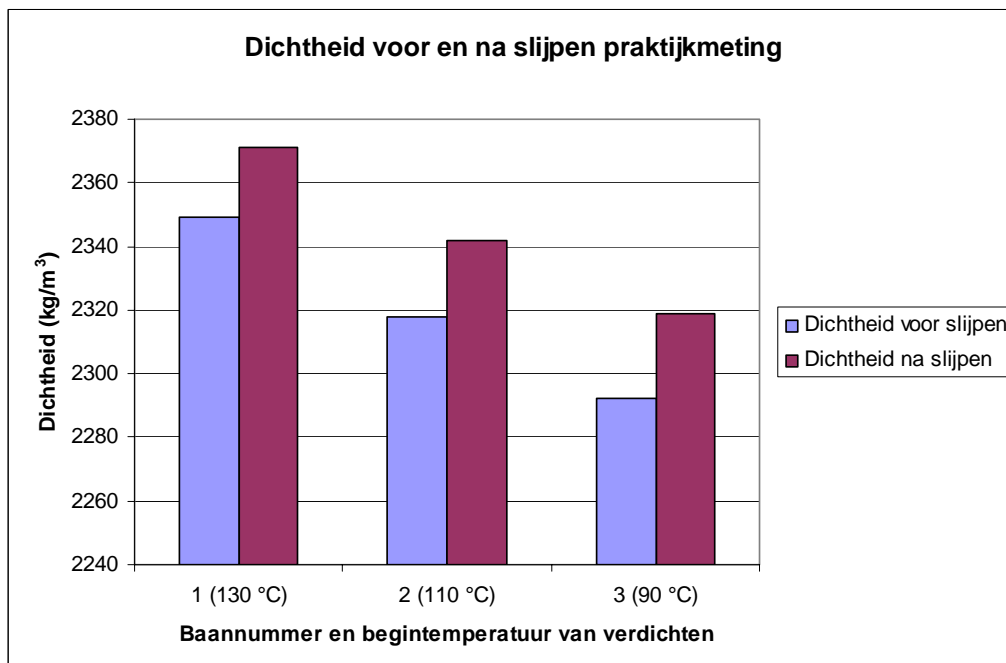
Figuur 4.72: Dichtheden kernen per baan praktijkmeting

Vervolgens is de nucleair gemeten dichtheid (tijdens de uitvoering) vergeleken met de bepaalde dichtheid (onder en boven water wegen) en dit is weergegeven in figuur 4.73. Hierbij valt op dat de nucleaire dichtheid structureel hoger is dan de bepaalde dichtheid (met uitzondering van 3-4, 29-30, 39-40). Dit komt overeen met de bevindingen van Ter Huerne (2004). Gemiddeld is de nucleaire dichtheid 45 kg/m^3 hoger dan de bepaalde dichtheid.



Figuur 4.73: Nucleaire dichtheid en bepaalde dichtheid praktijkmeting

In figuur 4.74 is de dichtheid van de kernen voor en na het slijpen weergegeven. Hierbij valt op dat de gemiddelde dichtheidsverbetering varieert van 22 tot 27 kg/m^3 en relatief is dit een variatie van 0,9% tot 1,2% en dus is het effect van het slijpen tussen de verschillende banen (en dus verdichtingstemperaturen) nihil.



Figuur 4.74: Dichtheid voor en na slijpen praktijkmeting

2.3.3.4 Mechanische eigenschappen

Omdat het verschil in scheurweerstand in het laboratorium tussen de verschillende verdichtingstemperaturen het duidelijkst naar voren is gekomen, zijn er in deze praktijkmeting alleen slijtproeven uitgevoerd om de mechanische kwaliteit te bepalen. Van deze slijtproeven zijn wederom een drietal aspecten zijn vergeleken; de slijtsterkte (oftewel de indirecte treksterkte), de scheurtaaiheid en de daarbij horende scheursnelheid. De resultaten hiervan zijn in deze paragraaf besproken.

N.B. In de figuren zijn op de X-as de gemiddelde gemeten temperaturen met de thermokoppels per baan weergegeven. De labels in de figuren geven dichtheid weer.

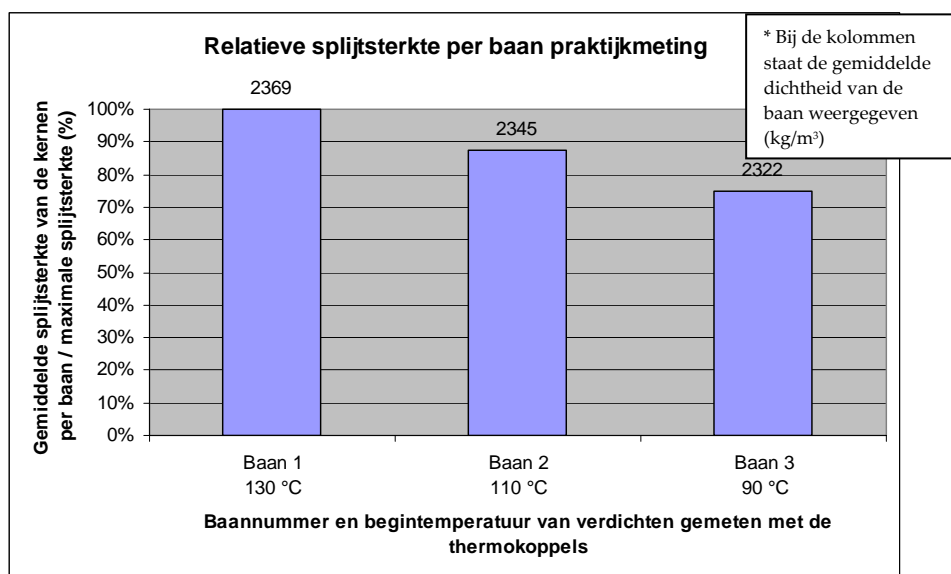
N.B.(2). De resultaten van kernen per plaat zijn gemiddeld, omdat de kernen redelijk gelijke resultaten opleverden. Verder is bij een aantal kernen de slijtproef min of meer mislukt, omdat de kern meer afschoof dan dat het spleet, oftewel de kern is al gespleten, maar blijft nog hangen tussen het hulpstuk van de testbank. Dit is geïllustreerd met een foto en het resultaat in figuur 4.21. Deze resultaten zijn niet meegenomen in de analyse.

Er zijn drie vergelijkingen gemaakt; een vergelijking tussen de drie banen, een vergelijking tussen baan 1 en 2, waarbij de kernen uit baan 1 met een lage dichtheid zijn vergeleken met de kernen met een hoge dichtheid uit baan 2, zodat de variabele dichtheid gelijk is gehouden en een vergelijking tussen baan 2 en 3 waarbij ook de variabele dichtheid gelijk is gehouden. Baan 1 en 3 zijn niet vergeleken met elkaar, omdat deze qua dichtheid significant verschilden.

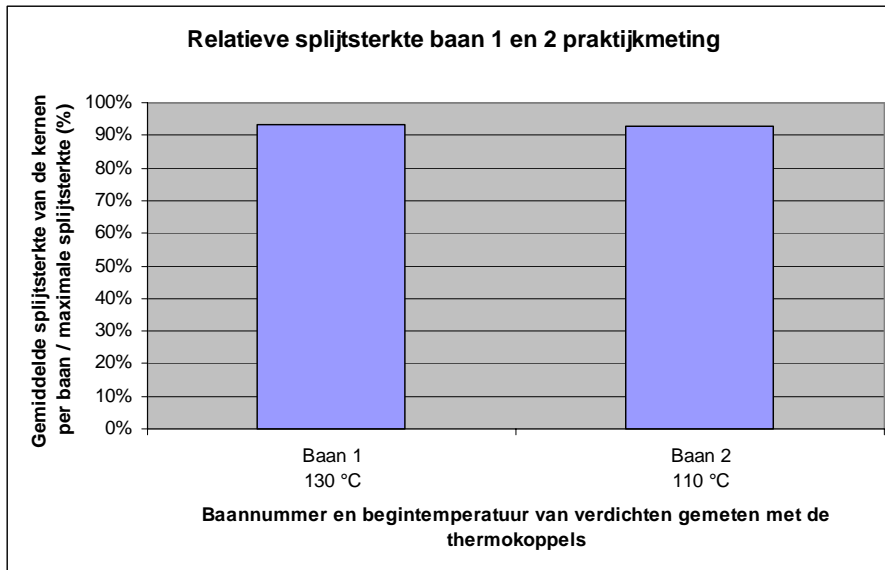
In deze paragraaf zijn alleen de relatieve waarden met elkaar vergeleken. In paragraaf 2.3 zijn de absolute waarden vergeleken met de absolute waarden gevonden in het laboratorium.

In figuur 4.75 is de relatieve slijtsterkte per baan weergegeven, in figuur 4.76 is de relatieve slijtsterkte voor baan 1 en 2 weergegeven en in figuur 4.77 is de relatieve slijtsterkte voor baan 2 en 3 weergegeven.

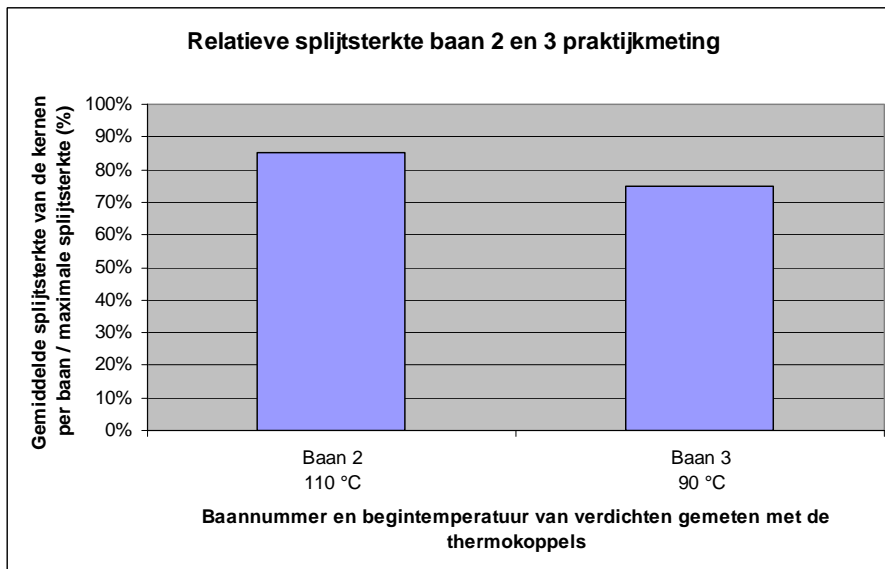
Hieruit kan geconcludeerd worden dat de slijtsterkte afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid gelijk gehouden wordt, is te zien dat tussen baan 1 en 2 geen verschil in slijtsterkte bestaat. Tussen baan 2 en baan 3 blijft het verschil in slijtsterkte aanwezig. Het verschil in slijtsterkte tussen baan 1 en 2 kan dus verklaard worden door het verschil in dichtheid, maar het verschil in slijtsterkte tussen baan 2 en 3 kan verklaard worden door de verdichtingstemperatuur.



Figuur 4.75: Relatieve slijtsterkte per baan praktijkmeting



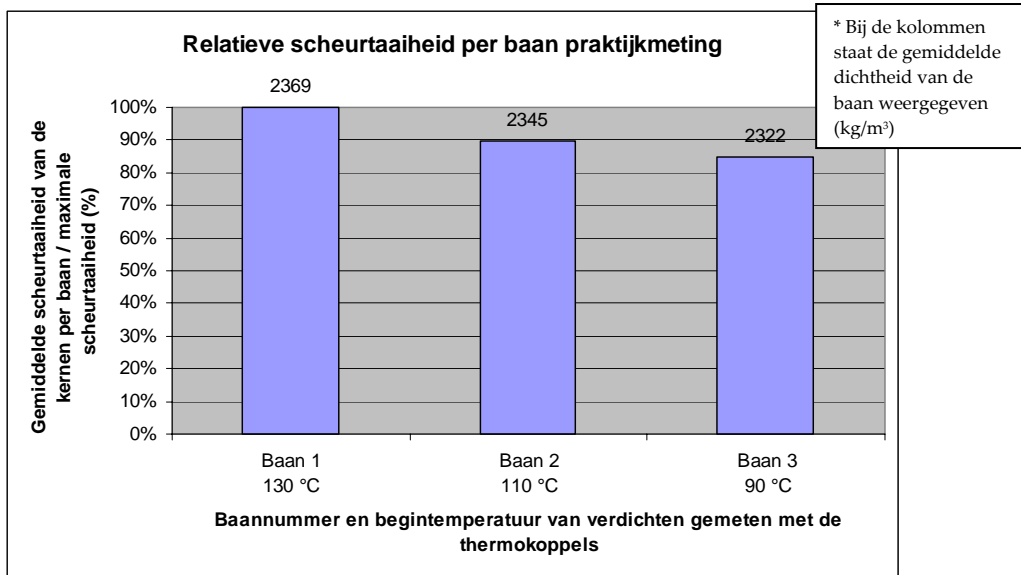
Figuur 4.76: Relatieve splijtsterkte baan 1 en 2 praktijkmeting



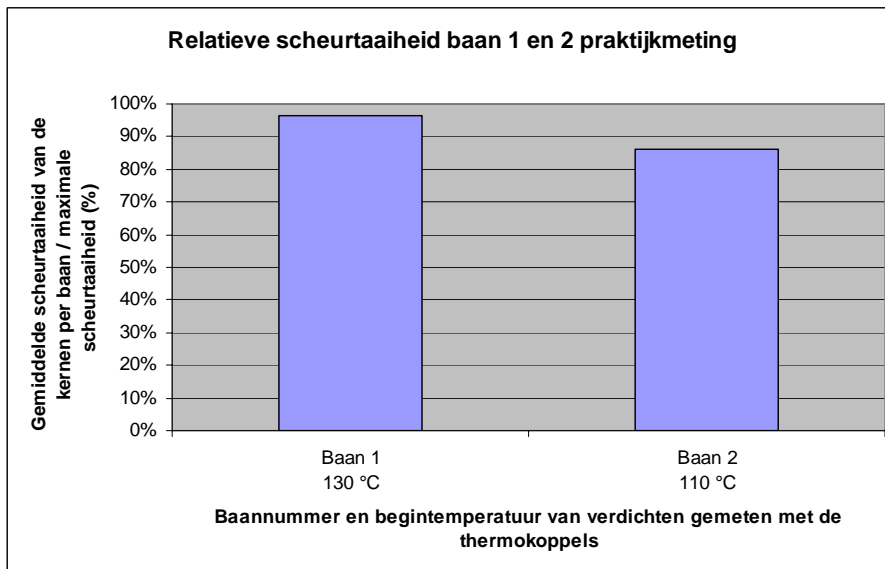
Figuur 4.77: Relatieve splijtsterkte baan 2 en 3 praktijkmeting

In figuur 4.78 is de relatieve scheurtaaiheid per baan weergegeven, in figuur 4.79 is de relatieve scheurtaaiheid voor baan 1 en 2 weergegeven en in figuur 4.80 is de relatieve scheurtaaiheid voor baan 2 en 3 weergegeven.

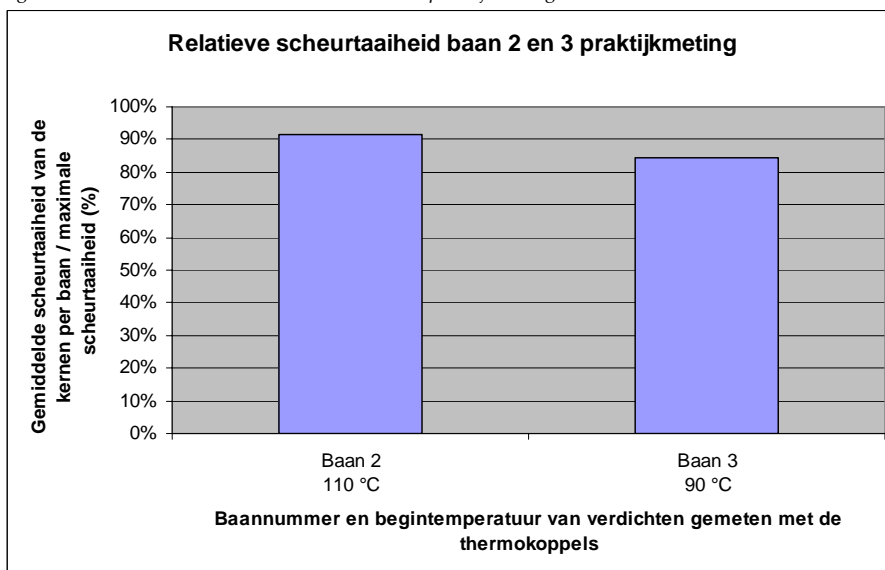
Hieruit kan geconcludeerd worden dat de scheurtaaiheid afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid gelijk gehouden wordt, is te zien dat de verschillen in scheurtaaiheid gelijk blijven. Deze verschillen in scheurtaaiheid kunnen dus verklaard worden door het verschil in verdichtingstemperatuur. Een verschil in dichtheid van 2369 kg/m^3 tot 2322 kg/m^3 heeft dus geen effect op de scheurtaaiheid.



Figuur 4.78: Relatieve scheurtaaiheid per baan praktijkmeting



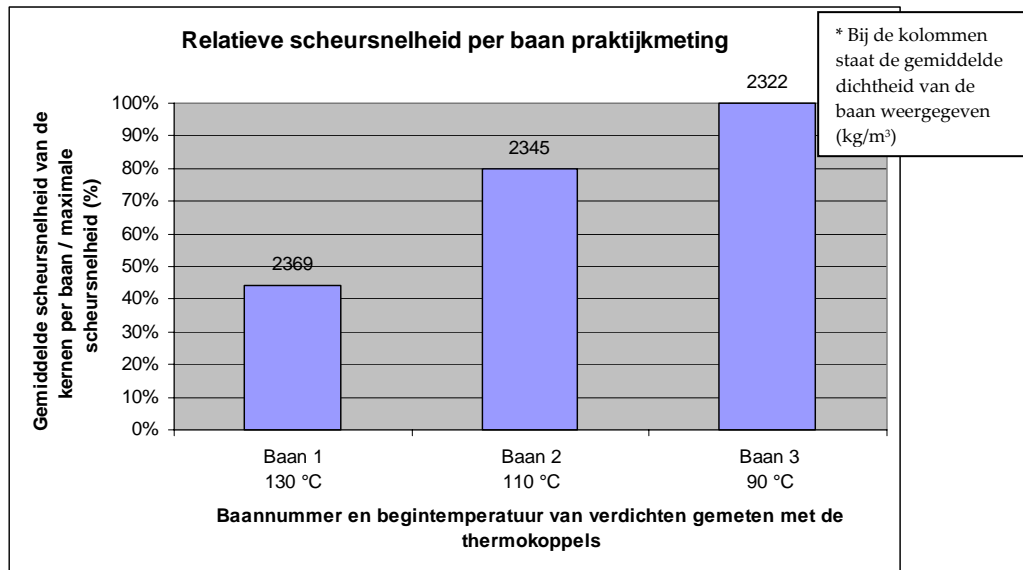
Figuur 4.79: Relatieve scheurtaaiheid baan 1 en 2 praktijkmeting



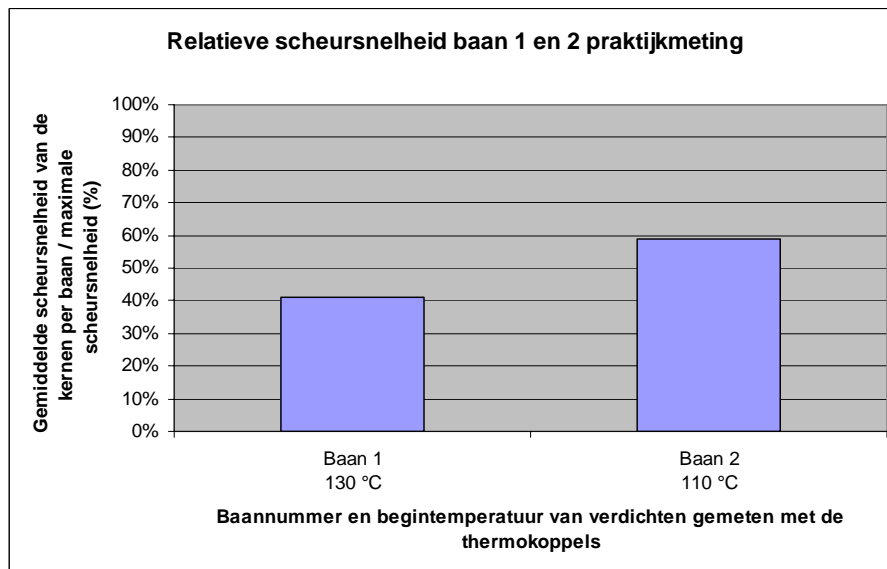
Figuur 4.80: Relatieve scheurtaaiheid baan 2 en 3 praktijkmeting

In figuur 4.81 is de relatieve scheursnelheid per baan weergegeven, in figuur 4.82 is de relatieve scheursnelheid voor baan 1 en 2 weergegeven en in figuur 4.83 is de relatieve scheursnelheid voor baan 2 en 3 weergegeven.

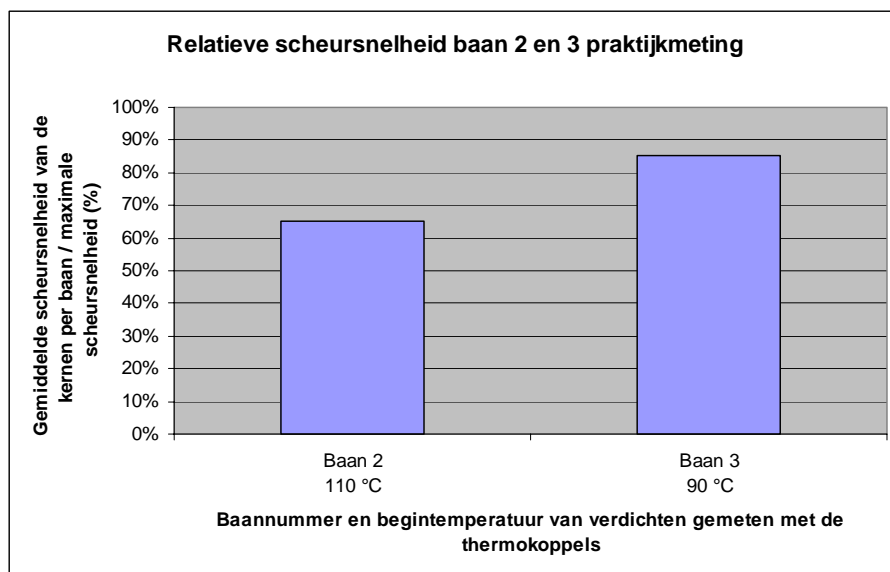
Hieruit kan geconcludeerd worden dat de scheursnelheid toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid gelijk gehouden wordt, is te zien dat de het verschil in scheursnelheid tussen baan 1 en baan 2 kleiner wordt, maar nog steeds aanwezig blijft en het verschil tussen baan 2 en baan 3 ongeveer gelijk blijft. Dit betekent dat het verschil in scheurtaaiheid tussen baan 1 en 2 voor een deel verklaard kan worden door de dichtheid en voor een deel door de verdichtingstemperatuur. Het verschil in scheursnelheid tussen baan 2 en 3 kan volledig worden verklaard door de verdichtingstemperatuur.



Figuur 4.81: Relatieve scheursnelheid per baan praktijkmeting



Figuur 4.82: Relatieve scheursnelheid baan 1 en 2 praktijkmeting



Figuur 4.83: Relatieve scheursnelheid baan 2 en 3 praktijkmeting

2.3.3.5 Textuur

Ook bij de praktijkmeting is er onderzocht of er een verschil zit in de textuur bij de verschillende verdichtingstemperaturen. Dit is wederom onderzocht met behulp van het verschil tussen de berekende en de bepaalde dichtheid van de proefstukken (waarbij wordt aangenomen dat het effect van opgesloten lucht bij beide manieren hetzelfde is).

In tabel 4.10 zijn de berekende en bepaalde dichtheid voor verschillende banen van de praktijkmeting weergegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het verschil bij een normale verdichtingstemperaturen (130°C) een stuk kleiner is dan bij de verdichtingstemperaturen 110 °C en 90 °C. Bij de normale verdichtingstemperatuur is het verschil 7 kg/m³ en bij de verdichtingstemperaturen 110 en 90 °C is het verschil 15 en 16 kg/m³. Dit betekent dat er, net als in het laboratorium, ongeveer 10 kg/m³ meer verschil is tussen de berekende en bepaalde dichtheid bij de lage verdichtingstemperaturen dan bij de normale verdichtingstemperatuur, dus er is ongeveer 10 kg/m³ meer aan 'open textuur'. Zoals aangegeven in het voorbeeld bij de resultaten van het laboratoriumonderzoek is dit een significant verschil van ongeveer 7% meer 'open textuur'.

Tabel 4.10: Dichtheden berekend en bepaald praktijkmeting

Baan en temperatuur	Na slijpen		
	Dichtheid ber. (kg/m ³)	Dichtheid bep. (kg/m ³)	Vershil
1 (130 °C)	2364	2371	7
2 (110 °C)	2326	2342	16
3 (90 °C)	2304	2319	15

2.3.4 Conclusies praktijkmeting

Het is de vraag in hoeverre de verdichting in het laboratorium de verdichting in de praktijk simuleert om de conclusies uit het laboratorium geldig te maken in de praktijk. In dit onderzoek is ervoor gekozen om te verifiëren of het effect van de verdichtingstemperatuur op de mechanische eigenschappen als fenomeen ook in de praktijk voorkomt. Er vindt dus geen verificatie plaats van aspecten als de precieze walskracht die uitgeoefend wordt, de vraag of de verschillende walsfasen (voorverdichting,

hoofdverdichting en afwalsen) op een juiste wijze gesimuleerd worden, etc. Het doel van deze praktijkcase is dus het toetsen van de resultaten uit het laboratorium, oftewel komt het fenomeen, dat asfaltmengsels verdicht bij verschillende verdichtingstemperaturen andere mechanische eigenschappen behalen ongeacht dat de beoogde dichtheid wordt behaald, in de praktijk ook voor.

De praktijkmeting betreft een werk in Dirkshorn. Bij een loods zijn er drie banen van 80 m lang, 4,5 m breed en 8 cm dik met STAB 0/16 (zonder PR) aangebracht, dus ongeveer 230 ton asfalt. De nacht voor de uitvoering en tijdens de uitvoering heeft het enorm geregend, dus de weersomstandigheden waren zeer slecht. De eerste baan is verdicht bij 150 °C, de tweede baan bij 130 °C en de derde baan bij 100 °C.

Er zijn een tweetal aspecten die het direct vergelijken van de praktijkmeting met de resultaten in het laboratorium bemoeilijken. Ten eerste was het mengsel van de praktijkmeting een stuk grover dan het mengsel dat in het laboratorium is beproefd. Daarnaast was door het slechte weer de ondergrond volledig verzadigd en er waren plassen, waardoor het klankbord verschillend was. Hierdoor is het moeilijk om de resultaten van de praktijkmeting direct te kunnen vergelijken met de resultaten uit het laboratorium, maar wel zijn deze aspecten voor de drie banen hetzelfde, dus een onderling vergelijk om te onderzoeken of het fenomeen ook in de praktijk voorkomt is wel te doen.

Achtereenvolgens zijn de belangrijkste resultaten van de praktijkmeting in Dirkshorn met betrekking tot (1) de temperatuur, (2) de verdichting en de dichtheid en (3) de mechanische eigenschappen besproken op basis van de sub-onderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2.5:

Hoe is de temperatuurhomogeniteit en temperatuurverdeling binnen de asfaltlaag in de praktijk?

Tijdens het gehele verwerkingsproces is de temperatuur van het asfaltmengsel gemeten. Bij de asfaltmolen was de gemiddelde temperatuur van de charges 161 °C en in de hopper van de spreidmachine was de temperatuur 155 °C tot 165 °C (gemeten met infraroodcamera's). Achter de balk was de gemiddelde temperatuur ongeveer 155 °C, gemeten met een digitale thermometer) met uitzondering van aantal stopplaatsen. Bij deze stopplaatsen is de temperatuur gezakt tot gemiddeld 130 °C. Verder was de temperatuurhomogeniteit goed.

Om de afkoeling in de loop van de tijd over de gehele asfaltdikte te meten zijn thermokoppels aangebracht in het midden en de onderkant van de asfaltlaag en de oppervlaktetemperatuur is gemeten met een warmtebeeldcamera. Uit deze metingen kan geconcludeerd worden dat de het effect van regen een grote invloed heeft op de oppervlaktetemperatuur. Het effect van deze relatief koude oppervlaktetemperatuur en warme onderlaag is onbekend en aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar te doen.

Onderzoeksvraag 2.2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingskracht en verdichtingsenergie in de praktijk?

Uit de walsbewegingen zijn de taken en verantwoordelijkheden van de verschillende walsen duidelijk zichtbaar. De combiwals is verantwoordelijk voor de grote bulkverdichting en de kleine wals walst de naden, bochten en tussen kolken etc. De combiwals heeft een gewicht van 10.400 kg, een last van 26,3 kg/cm en de banden hebben een walsrolkarakteristiek (volgens VBW-asfalt, formule 2.2) van 25,2 en de statische walsrol heeft een walsrolkarakteristiek van 20,6. De kleine tandemwals heeft een gewicht van 2900 kg, een last van 10,5 kg/cm en een walsrolkarakteristiek van 22,8.

De verdichtingskracht is in de praktijk afhankelijk van het aantal walsovergangen. Voor wat betreft de verdichtingskracht geldt dat er meer kracht nodig is om de streefdichtheid te behalen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. Bij baan 1 is na 3 walsovergangen de streefdichtheid al behaald, bij baan 2 na 12 walsovergangen en bij baan 3 wordt met moeite de streefdichtheid behaald.

De verdichtingsenergie is afhankelijk van de dichtheidsprogressie. Voor wat betreft de verdichtingsenergie geldt dat er meer energie nodig is om de streefdichtheid te behalen naarmate de verdichtings temperatuur omlaag gaat. Het wordt dus steeds moeilijker om de dichtheid te verbeteren als de temperatuur van het asfaltmengsel relatief laag is.

Verder is de dichtheidsprogressie gemeten na elke walsovergang waaruit geconcludeerd kan worden dat de dichtheid eerst toeneemt, daarna weer afneemt en uiteindelijk weer toeneemt. De verwachte oorzaak hiervan is het elastisch effect van asfalt; wanneer het asfalt terugveert, neemt de dichtheid af.

Onderzoeksvraag 2.4:

Is de streefdichtheid bij verschillende verdichtingstemperaturen te behalen in de praktijk?

Aan de hand van de dichtheden kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de beoogde dichtheid (2339 kg/m^3) behaald kan worden. Wel vallen de dichtheid van alle banen binnen de marges van de streefdichtheid, dus tot een temperatuur van $90 \text{ }^\circ\text{C}$ bij het begin van de verdichting is de dichtheid haalbaar.

Verder is de nucleair gemeten dichtheid (tijdens de uitvoering) vergeleken met de bepaalde dichtheid (onder en boven water wegen van de geboorde kernen) waaruit geconcludeerd kan worden dat de nucleaire dichtheid structureel hoger is dan de bepaalde dichtheid. Dit komt overeen met de bevindingen van Ter Huerne (2004). Gemiddeld is de nucleaire dichtheid 45 kg/m^3 hoger dan de bepaalde dichtheid.

Onderzoeksvraag 3.2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de mechanische eigenschappen in de praktijk?

Om antwoord te geven op deze vraag zijn de mechanische eigenschappen uit de praktijkmeting geanalyseerd. Omdat het verschil in scheurweerstand in het laboratorium tussen de verschillende verdichtingstemperaturen het duidelijkst naar voren is gekomen, zijn er in de praktijkmeting alleen slijtproeven uitgevoerd om de mechanische kwaliteit te bepalen.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de slijtsterkte afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Hierbij kan het verschil in slijtsterkte tussen baan 1 ($150 \text{ }^\circ\text{C}$) en 2 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) verklaard worden door het verschil in dichtheid, maar het verschil in slijtsterkte tussen baan 2 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) en 3 ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) kan verklaard worden door de verdichtingstemperatuur.

Voor wat betreft de scheurtaaiheid kan geconcludeerd worden dat de scheurtaaiheid afneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Wanneer de dichtheid gelijk gehouden wordt, is te zien dat de verschillen in scheurtaaiheid gelijk blijven. De verschillen in scheurtaaiheid kunnen dus verklaard worden door het verschil in verdichtingstemperatuur. Een verschil in dichtheid van 2369 kg/m^3 tot 2322 kg/m^3 heeft dus geen effect op de scheurtaaiheid.

Verder kan geconcludeerd worden dat de scheursnelheid toeneemt naarmate de verdichtingstemperatuur en de dichtheid afnemen. Het verschil in scheurtaaiheid tussen baan 1 ($150 \text{ }^\circ\text{C}$) en 2 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) kan voor een deel verklaard kan worden door de dichtheid en voor een deel door de verdichtingstemperatuur. Het verschil in scheursnelheid tussen baan 2 ($130 \text{ }^\circ\text{C}$) en 3 ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) kan volledig worden verklaard door de verdichtingstemperatuur.

Op basis van deze resultaten kan geconcludeerd worden dat het fenomeen dat in het laboratorium is gevonden; dat de mechanische eigenschappen verschillen door een andere verdichtingstemperatuur, ondanks dat de streefdichtheid behaald is, ook in de praktijk voorkomt.

Voor het doen van een volgende praktijkmeting worden nog een aantal aanbevelingen gedaan. Een ideale praktijkmeting vindt plaats onder betere omstandigheden, in ieder geval zonder neerslag. Daarnaast is het van belang om een goed en homogeen klankbord te krijgen. Dit kan bereikt worden door een tussenlaag als te onderzoeken mengsel te kiezen. Verder wordt aangeraden om bij een vol-

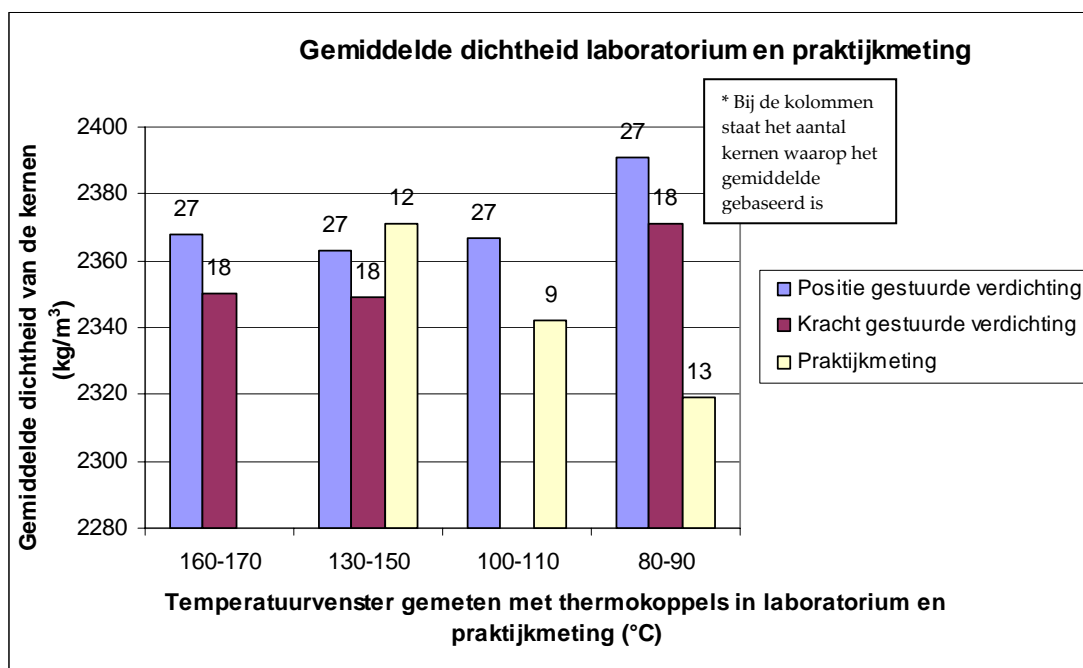
gende praktijkmeting te focussen op één of twee aspecten, zodat alle andere variabelen zo goed mogelijk gelijk gehouden kunnen worden.

2.4 Laboratorium versus praktijk

Het laboratoriumonderzoek heeft inzicht gegeven in de mechanische eigenschappen bij verschillende verdichtingstemperaturen. De praktijkmeting bevestigt deze resultaten. Vervolgens zijn in deze paragraaf de twee verdichtingsprocedures uit het laboratorium met de praktijkmeting vergeleken. De verschillen tussen de resultaten uit het laboratorium en de praktijkmeting hebben een tweetal oorzaken; ten eerste zijn in het laboratorium ideale omstandigheden (een stijve onderlaag, goede opsluiting, geen regen, etc.) en de metingen in de praktijk zijn onder minder ideale omstandigheden gedaan en ten tweede is er in het laboratorium meer verdichtingsenergie uitgeoefend dan in de praktijkmeting.

2.4.1.1 Dichtheid

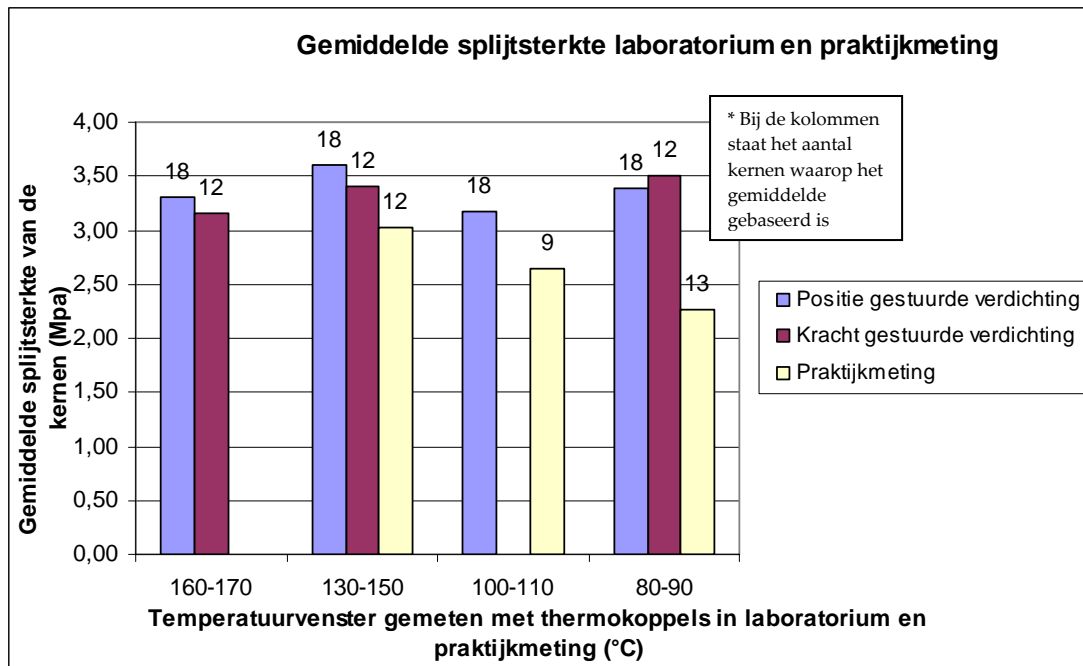
In figuur 4.84 zijn de dichtheden van de positie- en kracht gestuurde verdichting en van de praktijkmeting weergegeven. Opvallend is dat hier tegengestelde trends zichtbaar zijn; in het laboratorium leidt een lagere verdichtingstemperatuur tot een hogere dichtheid en in de praktijk leidt een lagere verdichtingstemperatuur tot een lagere dichtheid. Wel valt op dat bij de normaal gebruikte verdichtingstemperatuur (135 °C) de overeenkomst tussen het laboratorium en de praktijk het grootst is en hoe lager de verdichtingstemperatuur, hoe groter het verschil tussen de dichtheid in het laboratorium en de dichtheid in de praktijk.



Figuur 4.84: Dichtheid positie- en kracht gestuurde verdichting en praktijkmeting

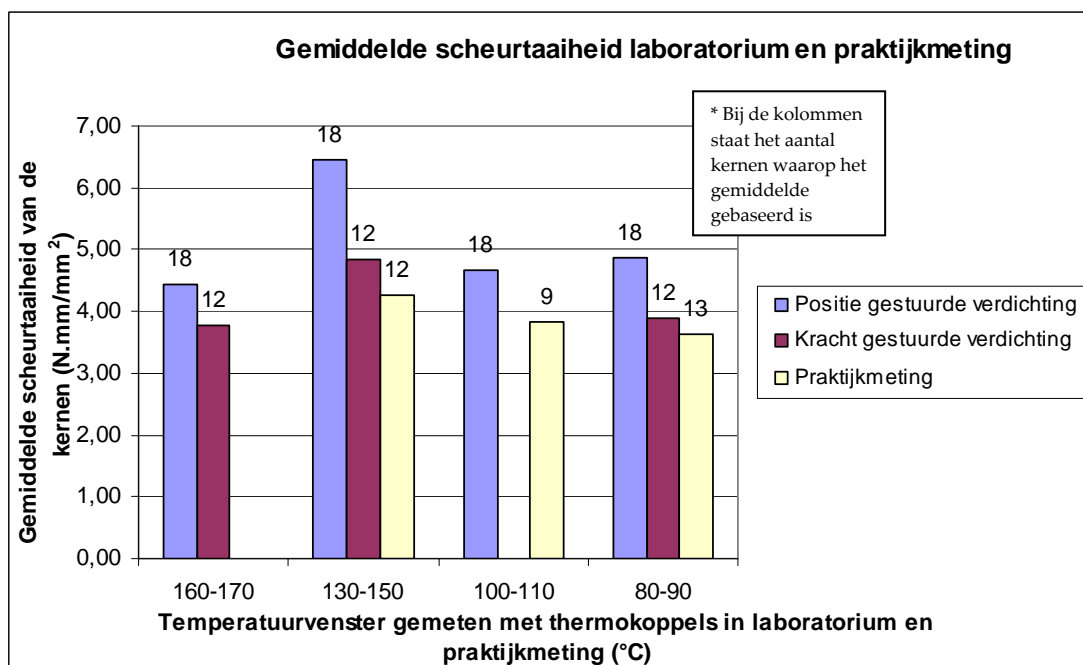
2.4.1.2 Mechanische eigenschappen

In figuur 4.85 is de slijtsterkte van de positie- en kracht gestuurde verdichting en van de praktijkmeting weergegeven. Bij de slijtsterkte is geen heldere relatie zichtbaar, wel valt wederom op dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te groter het verschil tussen laboratorium en de praktijk.



Figuur 4.85: Spijsterkte positie- en kracht gestuurde verdichting en praktijkmeting

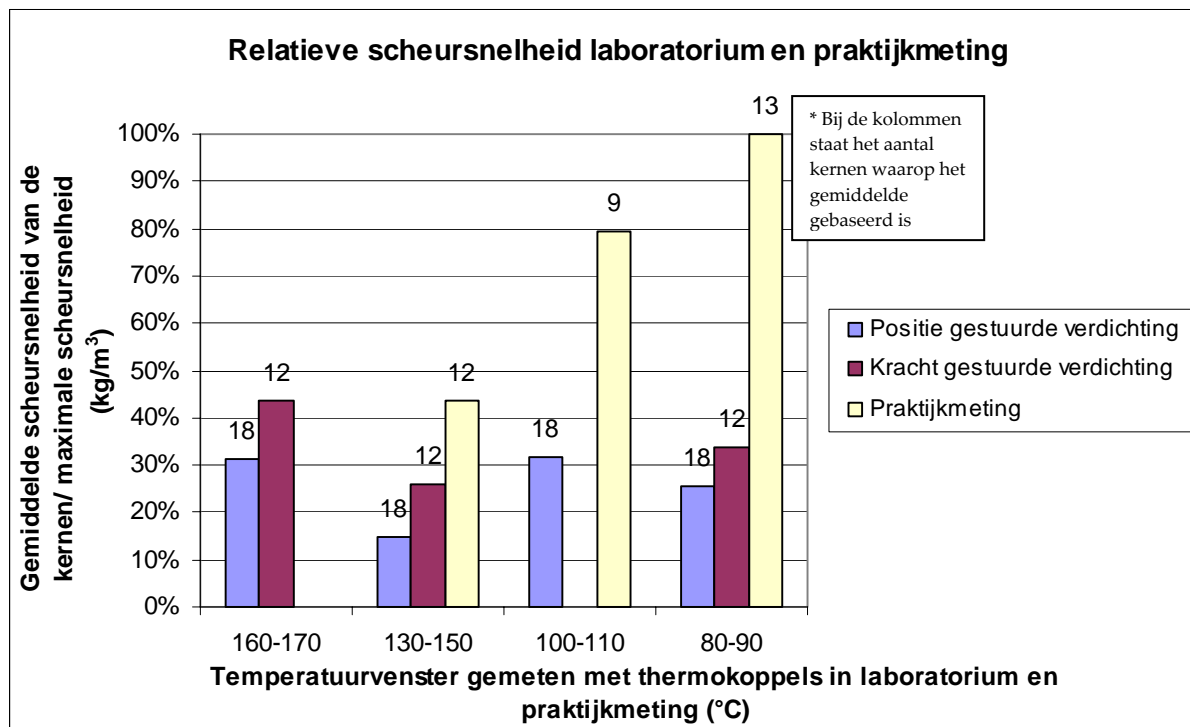
In figuur 4.86 is de scheurtaaiheid van de positie- en kracht gestuurde verdichting en van de praktijkmeting weergegeven. Hierbij valt op dat de scheurtaaiheid van de positie gestuurde verdichting structureel hoger liggen dan de metingen in de praktijk. Een mogelijke verklaring voor dit verschil is de grote hoeveelheid verdichtingsenergie die gebruikt is om positie gestuurd te verdichten. De scheurtaaiheid van de kracht gestuurde verdichting voorspelt bij alle onderzochte verdichtingstemperaturen de scheurtaaiheid uit de praktijk een stuk nauwkeuriger.



Figuur 4.86: Scheurtaaiheid positie- en kracht gestuurde verdichting en praktijkmeting

In figuur 4.87 is de relatieve scheursnelheid van de positie- en kracht gestuurde verdichting en van de praktijkmeting weergegeven. Hierbij valt op de dat de scheursnelheden in de praktijk een stuk hoger liggen dan de scheursnelheden in het laboratorium. Wederom voorspelt de kracht gestuurde verdich-

ting de scheursnelheid beter dan de positie gestuurde verdichting. Daarnaast valt op dat het verschil tussen laboratorium en de praktijk groter wordt bij de lagere verdichtingstemperaturen.



Figuur 4.87: Relatieve scheursnelheid positie- en kracht gestuurde verdichting en praktijkmeting

2.4.1.3 Conclusies positieverdichting versus krachtverdichting

Er is een vergelijk gemaakt tussen de resultaten van de positie- en kracht gestuurde verdichting in het laboratorium en de resultaten van de praktijkmeting op basis van de dichtheid en de behaalde mechanische eigenschappen. De verschillen tussen de resultaten uit het laboratorium en de praktijkmeting hebben een tweetal oorzaken; ten eerste zijn in het laboratorium ideale omstandigheden (een stijve onderlaag, goede opsluiting, geen regen, etc.) en de metingen in de praktijk zijn onder minder ideale omstandigheden gedaan en ten tweede is er in het laboratorium meer verdichtingsenergie uitgeoefend dan in de praktijkmeting.

Bij de dichtheid en de splijtsterkte is een opvallende trend zichtbaar; bij de normaal gebruikte verdichtingstemperatuur (135 °C) is de overeenkomst tussen het laboratorium en de praktijk het grootst is en hoe lager de verdichtingstemperatuur, hoe groter het verschil tussen het laboratorium en de praktijk. Voor wat betreft de scheurtaaiheid en de scheursnelheid geldt dat de scheurtaaiheden in het laboratorium structureel hoger liggen en dus de scheursnelheden structureel lager. Dit is logisch, omdat de omstandigheden in het laboratorium beter zijn dan in bij de praktijkmeting, qua ondergrond, opsluiting, etc. Ook hierbij valt op dat het verschil tussen het laboratorium en de praktijk groter wordt bij de lagere verdichtingstemperaturen. Daarnaast wordt geconcludeerd dat de kracht gestuurde verdichting in het laboratorium bij alle onderzochte verdichtingstemperaturen de scheurtaaiheid en scheursnelheid in de praktijk een stuk nauwkeuriger voorspelt dan de positie gestuurde verdichting. Een mogelijke verklaring hiervoor is de grote hoeveelheid verdichtingsenergie die gebruikt wordt om positie gestuurd te verdichten, hetgeen in de praktijk nauwelijks haalbaar is.

2.5 Conclusies empirisch onderzoek

De conclusies van het empirisch onderzoek zijn geschreven aan de hand van de onderzoeksvragen 2 en 3.

Onderzoeksvraag 2:

Welke effecten hebben verschillende verdichtingstemperaturen op de verdichtingsenergie en de dichtheid?

Uit de laboratoriumresultaten en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat de maximale verdichtingskracht, de cumulatieve verdichtingskracht en de verdichtingsenergie toenemen naarmate de verdichtingstemperatuur afneemt. De meest logische verklaring hiervoor lijkt dat de bitumen meer viskeus zijn en daarmee het mengsel moeilijker verdichtbaar is. Bij verdichtingstemperaturen lager dan 100 °C is wel gebleken dat het moeilijk is om de dichtheid te behalen en bij verdichtingstemperaturen hoger dan 150 °C dient er rekening mee worden gehouden dat er minder kracht nodig is om te verdichten en dus evt. met een kleinere wals verdicht moet worden of dat er nog gewacht moet worden met verdichten.

Verder dient ermee rekening te worden gehouden dat er een terugveereffect tijdens het verdichten plaatsvindt, en dus een afname van de dichtheid. Wanneer dit effect plaatsvindt is onder andere afhankelijk van de verdichtingstemperatuur.

Aan de hand van de dichtheden uit het laboratorium en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat hoe lager de verdichtingstemperatuur, des te moeilijker de streefdichtheid behaald kan worden. Desalniettemin is het mogelijk om de streefdichtheid te behalen (binnen de marges) door bij een temperatuur van 90 °C te beginnen met de verdichting. Verder dient er in de praktijk rekening gehouden te worden dat de nucleaire dichtheidsmetingen structureel hoger zijn dan werkelijke dichtheden.

Onderzoeksvraag 3:

Wat zijn de mechanische consequenties van het verdichten bij verschillende verdichtingstemperaturen?

Om de mechanische eigenschappen te bepalen is gekozen voor een slijt- en een triaxiaalproef om een drietal redenen; ten eerste omdat de maatgevende schadebeelden (scheur- en spoorvorming) voor onderlagen hiermee worden afgedekt (STAB), de proefopstellingen beschikbaar zijn en omdat het juiste aantal proefstukken uit een plaat gehaald kunnen worden om een betrouwbaar resultaat te verkrijgen.

Aan de hand van de resultaten uit het laboratorium en de praktijkmeting kan geconcludeerd worden dat, ondanks dat de streefdichtheid behaald kan worden bij een temperatuur van 90°C aan het begin van de verdichting, er een groot verschil in scheurtaaiheid en scheursnelheid tussen de verdichtingstemperaturen zichtbaar is. Beginnen met verdichten bij hogere of lagere verdichtingstemperaturen kan leiden tot 40% afname van de scheurtaaiheid en 30% toename van de scheursnelheid.

Deze kwaliteitsreductie, en dus levensduurverkorting, wordt in de huidige kwaliteitscontrole, waarbij alleen de dichtheid achteraf gecontroleerd wordt, niet gedetecteerd. Het lijkt daarom niet voldoende om alleen de dichtheid te controleren, maar ook de verdichtingstemperatuur tijdens het proces, zodat er ook nog bijgestuurd kan worden tijdens het proces en achteraf zal ook de scheurtaaiheid en scheursnelheid gecontroleerd moeten worden. De verdichtingstemperatuur, de scheurtaaiheid en scheursnelheid lijken daarmee efficiëntere parameters om het asfalt(mengsel) te evalueren en beoordelen dan de dichtheid, omdat de dichtheid ook gehaald kan worden door er meer energie in te stoppen of bij een hogere temperatuur te verdichten.

Dit bevestigt het onderzoek van Recansens et al (2000) die concluderen dat de scheurtaaiheid en de verdichtingstemperatuur efficiëntere parameters zijn om het asfaltmengsel te evalueren en beoordelen dan de dichtheid voor Spaanse asfaltmengsels.

Literatuurlijst

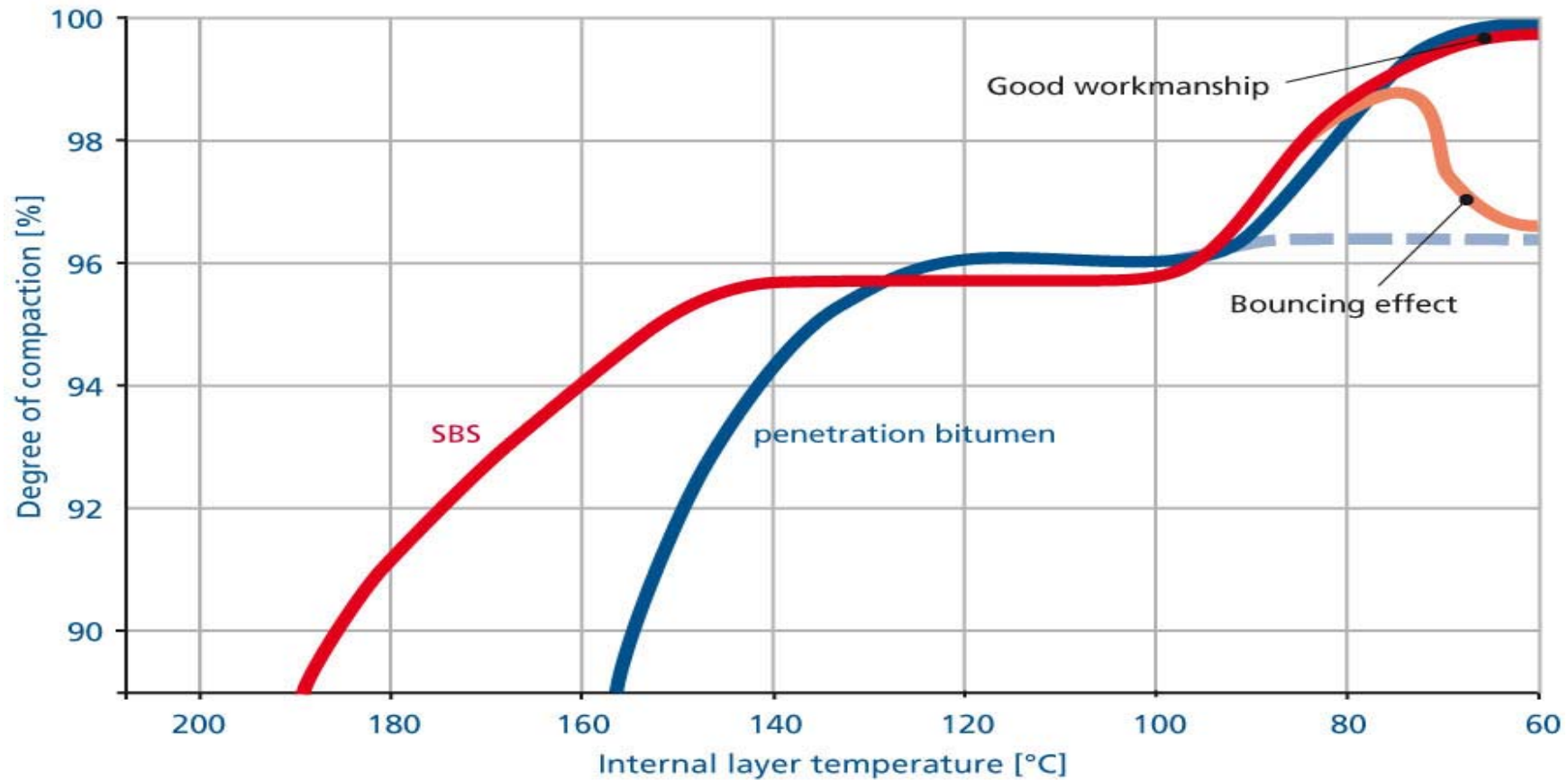
- Bate, R., Kuhn, D., en Wells, C. (1995). *A Systems Engineering Capability Maturity Model*.
- Chadbourn, B. A., Newcomb, D. E., Voller, V. R., Desombre, R. A., Luoma, J. A., en Timm, D. H. (1998). "An asphalt paving tool for adverse conditions." *Minnesota Dept. of Transportation Final Report MN/RC-1998*, 18.
- Bossemeyer, H. R. (1986). *Temperaturverlauf beim Einbau von bituminösen Mischgüt*, Technischen Hochschule Darmstadt.
- Daines, M. E. (1985). "Cooling time of bituminous layers and time available for their compaction." *Transport and road research laboratory report*, 4.
- De Bondt, A. H. (1999). Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays.
- De Man, M. (2008). "Leren door reflecteren; Een methode om asfaltverwerkingsploegen tot meer lerende en reflecterende teams te vormen." *Afstudeerrapport universiteit Twente*.
- Decker, D. S. (2006). "State-of-the-Practice for Cold-Weather Compaction of Hot-Mix Asphalt Pavements." *Factors Affecting Compaction of Asphalt Pavements*, 27.
- Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L., Reubush, S. D., en Freeman, T. E. "Development and Validation of a Model to Predict Pavement Temperature Profile."
- Dorée, A. G., Miller, S. R., en Ter Huerne, H. L. (2008). "Asfalt, wat bakken we ervan?" *Combinatie van artikel en presentatie van de CROW infradagen*
- Dorée, A. G., en ter Huerne, H. L. (2005). "Professionalisering asfalt wegenbouw sector; Van ambacht naar industrie."
- Erkens, S. M. J. G. (2002). *Asphalt concrete response; Determination, modelling and prediction*.
- Figge, H. (1987). *Verdichtungs- und belastungsverhalten bituminöser gemische (Dissertation)*.
- Head, K. H. (1980). *Manual of soil laboratory testing*.
- Jordan, P. G., Thomas, M. E. (1976). "Prediction of cooling curves for hot-mix paving materials by a computer program." *Transport and road research laboratory report*.
- Khan, Z. A., Al-Abdul Wahab, H. I., Asi, I., en Ramadhan, R. (1998). "Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction." *Construction and Building Materials*, 12, 373-384.
- Krass, K. (1971). *Kriechuntersuchungen an Zylindrischen Asphaltprobekörpern*.
- Luoma, J. A., Allen, B., Voller, V. R., Newcomb, D. E. (1995). "Modeling of heat transfer during asphalt paving." *Numerical methods in thermal problems*, 6 (2), 1125-1135.
- McClave, J. T., Benson, P. G., en Sincich, T. (2007). *Statistiek; Een inleiding voor het hoger onderwijs*.
- Miller, S. R., en Dorée, A. G. (2008). "Temperature profiling and the monitoring of equipment movements during construction".
- Miller, S. R., en Dorée, A. G. (2009). "Proefproject Aziëhavenweg." *Asfalt nr. 2, juni 2009*.
- Molenaar, A. A. A. (1983). Structural performance and design of flexible road constructions and asphalt concrete overlays.
- Molenaar, A. A. A., en Houben, L. J. M. (2003). *Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen*.
- Mollenhauer, K. "Comparative test project + standard compaction procedure." *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Rhodos.
- Mollenhauer, K., en Wistuba, M. P. "Experiences from comparative laboratory testing." *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Rhodos.
- NEVUL. (2006). *Nevul; Activiteiten 2005, certificatie 2006, lijst erkende vulstofmerken*.
- Recasens, M., Rodrigo, P., Jiménez, F., en Martínez, A. (2000). "Quality specifications for bituminous mixtures using the indirect tensile strength." 2nd Europhalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- Rijkswaterstaat. (2005). Bitumineuze overgangsconstructie; Besteksomschrijving aansluiting wegdek brugdek A73-Zuid

- Simons, B., en ter Huerne, H. L. (2008). "Op weg naar een beter beheerst asfaltverwerkingsproces." *VBW-Asfalt*, Nr. 2, p. 16-20.
- Sluer, B. (2007). "Zoab in process; Zo naar verbetering van levensduur."
- Ter Huerne, H. L. (2004). *Compaction of Asphalt Road Pavements Using Finite Elements and Critical State Theory*, University of Twente.
- Ter Huerne, H. L., en Dorée, A. G. (2005). Professionalisering asfalt wegebouw sector, van ambacht naar industrie.
- Timm, D. H., Voller, V. R., Lee, E., en Harvey, J. (2001). "Calcool: A multi-layer asphalt pavement cooling tool for temperature prediction during construction." *International Journal of Pavement Engineering*, 2(3), 169-185.
- Van Dee, R. (1999). *Modelling of the compaction of asphalt layers: A survey into the influence of various factors on the compaction of asphalt layers in practice*, Technische universiteit Delft.
- Van der Velden, J. W. (2003). *Wegenbouwkunde*, Wolters-Noordhoff b.v.
- Van Stek, P. J., en Linden, A. H. G. (1992). *Het verdichten van asfalt in de praktijk*, VBW-asfalt.
- VBW-asfalt. (2000). *Asfalt in wegen- en waterbouw*.
- VBW-asfalt. (2001). "Functionele proeven voor asfalt." *Asfalt nr. 3*, 2001.
- VBW-asfalt. (2003). "Waarom walsen?"
- Verbaan, W. (2008). *Mega Trends Bouw*, Stichting PSIBouw.
- Verschuren, P., en Doorewaard, H. (2007). "Het ontwerpen van onderzoek." Den Haag: LEMMA.
- Wennigsen, B.-P. (2008). *Handleiding walssectorcompressor WSV-2008*.
- Wistuba, M. P. "Status quo in the european union." *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, Rhodos.

Bijlagen appendix

Bijlage 1.1: Fasen verdichtingsproces volgens Ooms

Sketch of compaction mechanism of high-quality SBS modified asphalt

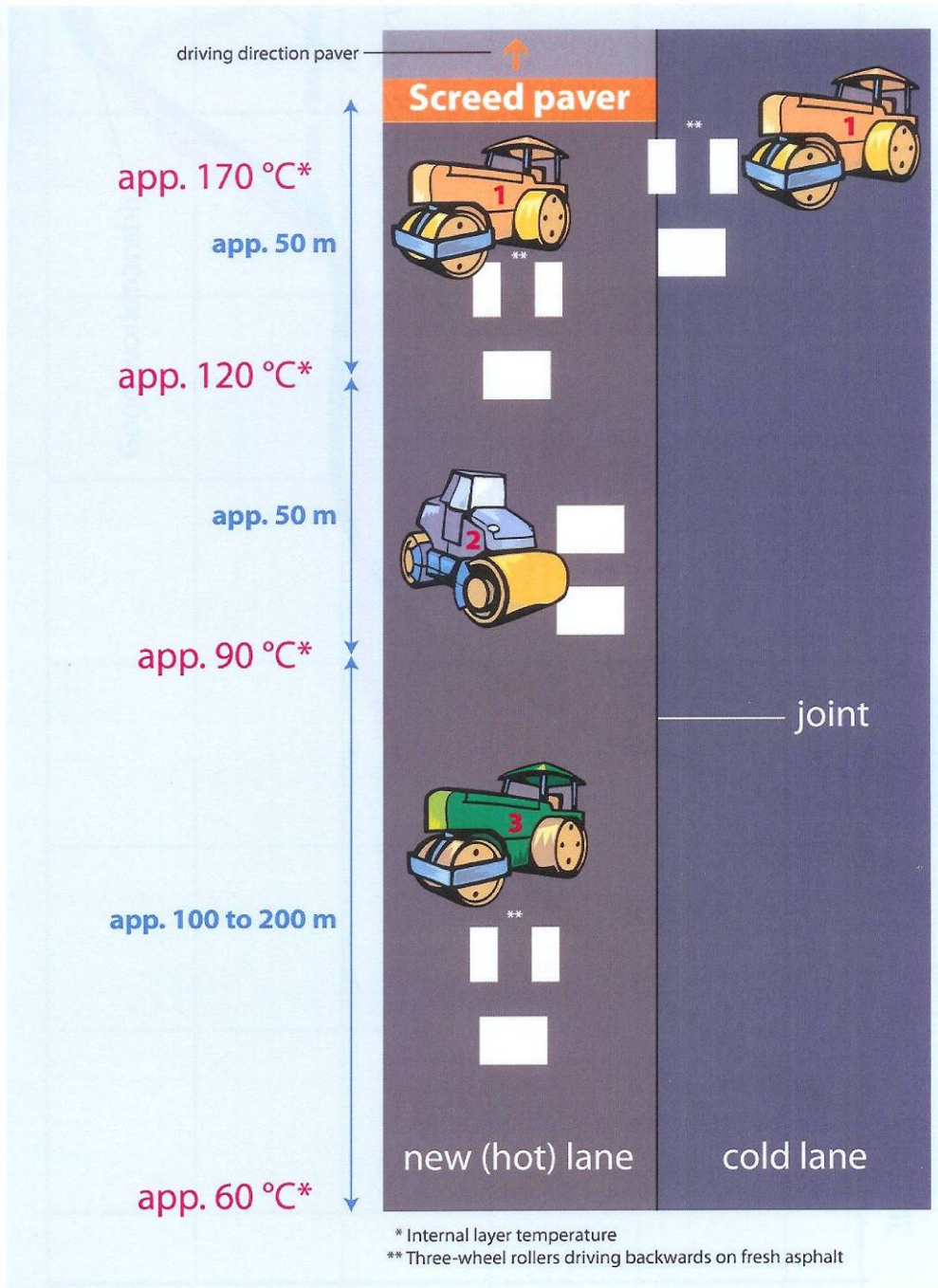


Good workmanship: When continuing compaction till 60 °C (internal layer temperature)

Bouncing effect: When ending compaction at 80-90 °C (internal layer temperature)

Illustration of Sealoflex® rolling process

project A45 Billing - May/June 2008



Ooms

International Holding bv

Bijlage 2.1: Fotoreportage proces laboratoriumonderzoek

In deze appendix wordt het proces van verdichten tot aan beproeven in chronologische volgorde in beeld met behulp van foto's weergegeven.

Vorbereidingen



Figuur A4.1: Aankomst materiaal



Figuur A4.2: Materialen drogen



Figuur A4.3: Materialen zeven



Figuur A4.4: Materialen inweegen

Verdichten met de Freundl plaatverdichter



Figuur A4.5: Materialen in de stoof verwarmen



Figuur A4.6: Bitumen invegen



Figuur A4.7: Materiaal in de menger



Figuur A4.8: Temperatuur meten na het mengen



Figuur A4.9: Materiaal wegen



Figuur A4.10: Materiaal en thermodraden aanbrengen



Figuur A4.11: Afolakken



Figuur A4.12: Temperatuur meten voor verdichten



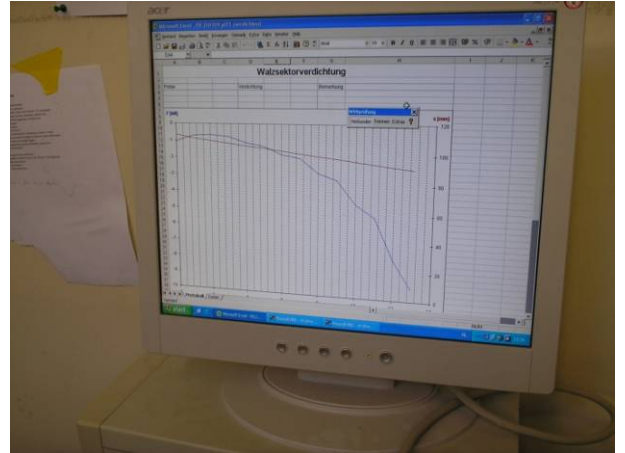
Figuur A4.13: Papier aanbrengen



Figuur A4.14: Freundl plaatverdichter instellen



Figuur A4.15: Verdichten met de Freundl plaatverdichter



Figuur A4.16: Verdichting volgen op de pc



Figuur A4.17: Steunbak plaatsen



Figuur A4.18: Steunbak met plaat loshalen



Figuur A4.19: Asfaltplaat met steunbak



Figuur A4.20: Asfaltplaat zonder steunbak

Boren, slijpen, wegen en in de koeling



Figuur A4.21: Boren van kernen



Figuur A4.22: Geboorde kernen



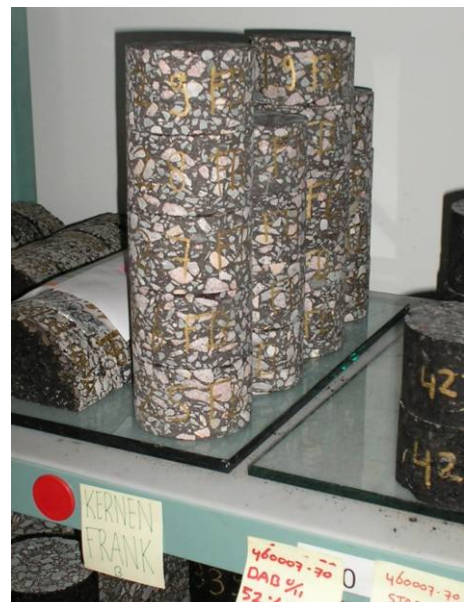
Figuur A4.23: Slijpen van kernen



Figuur A4.24: Geslepen kernen

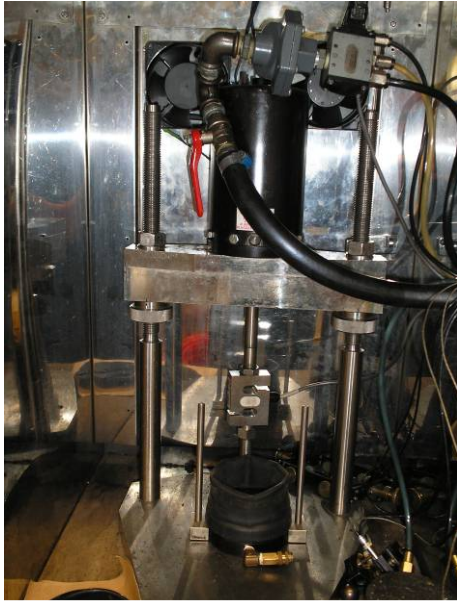


Figuur A4.25: Onder en boven water wegen



Figuur A4.26: Kernen in de koeling

Beproeven



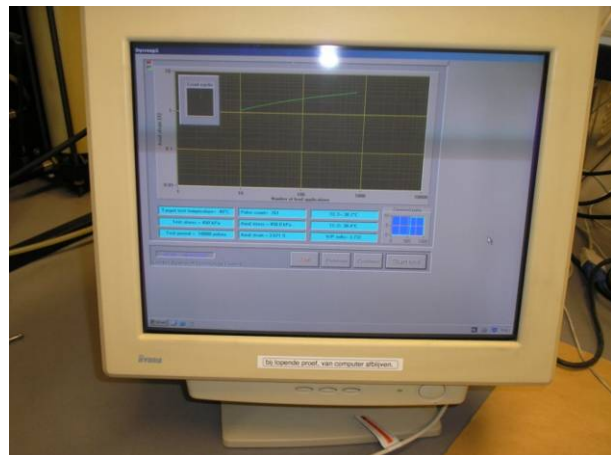
Figuur A4.27: Proefopstelling triaxiaalproef



Figuur A4.28: Wrijfingreductie aanbrengen



Figuur A4.29: Proefopstelling (detail)



Figuur A4.30: Resultaten op de pc volgen



Figuur A4.31: Proefopstelling splijtproef



Figuur A4.32: Gespleten kernen

Bijlage 2.2: Testen positie- en kracht-gestuurde verdichting

In deze appendix zijn de testen met de positie- en kracht-gestuurde verdichting uitgebreid besproken.

Positie-gestuurde verdichting

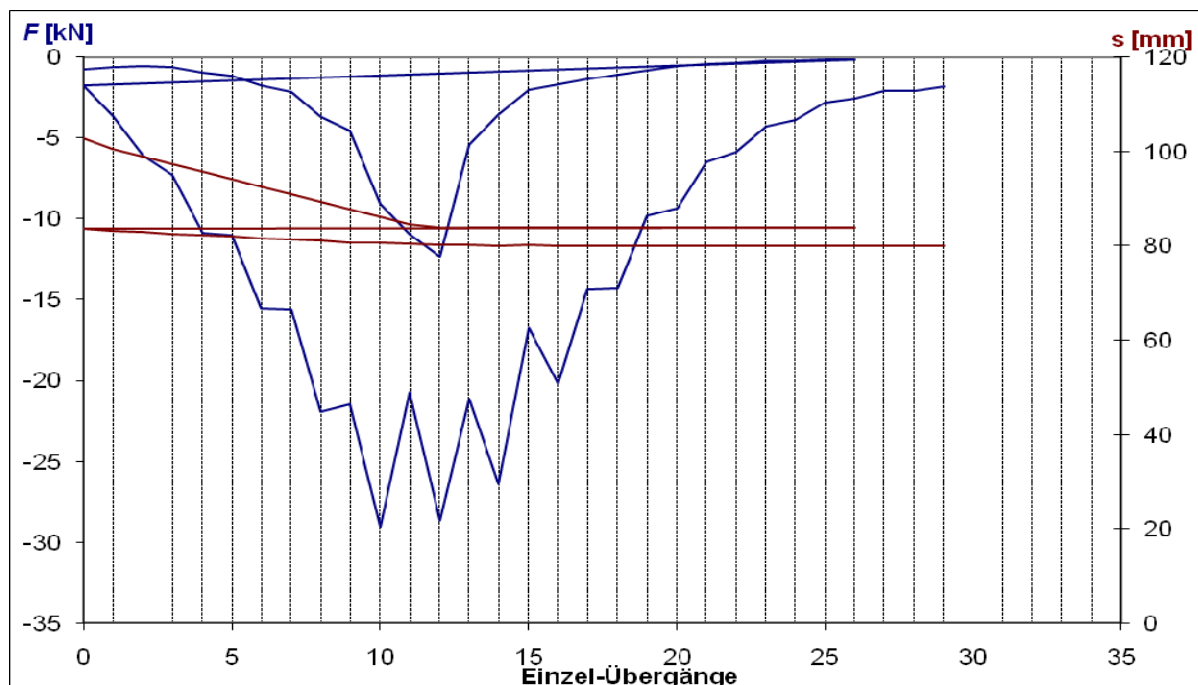
Voor de positie-gestuurde verdichting van de STAB 0/16 mengsels zijn een tweetal testen gedaan:

- Het verdichten van het mengsel in 2 fasen: In fase 1 wordt het mengsel tot ongeveer 84 mm verdicht met relatief weinig kracht en fase 2 vindt ongeveer 5 tot 10 minuten later plaats, waarbij verdicht wordt naar 80 mm met relatief veel kracht;
- Het verdichten van het mengsel in 1 fase: Het verdichten van het mengsel in één keer tot 80 mm met relatief veel kracht.

Het principe achter methode 1 is dat het verdichtingsproces plaatsvindt in meerdere fasen. In de eerste fase vindt een korrelrangschikking plaats, waarbij de stenen langs elkaar moeten kunnen glijden (en dus moet de mortel nog voldoende flexibel zijn). In de tweede fase vindt de werkelijke verdichting plaats, waarbij door het toenemen van de kracht de dichtheid toeneemt.

Beide methoden zijn getest en de resultaten zijn weergegeven in figuur 4.2.1&4.2.2 en 4.2.3&4.2.4. De methoden zijn bij twee verschillende temperaturen van verdichten getest om te voorkomen dat het verschil alleen zichtbaar is bij een bepaalde verdichtingstemperatuur. De resultaten uit figuur 4.2.1 en 4.2.2 betreffen de verdichting bij 140-150 graden Celsius en de resultaten uit figuur 4.2.3 en 4.2.4 betreffen de verdichting bij 100-110 graden Celsius.

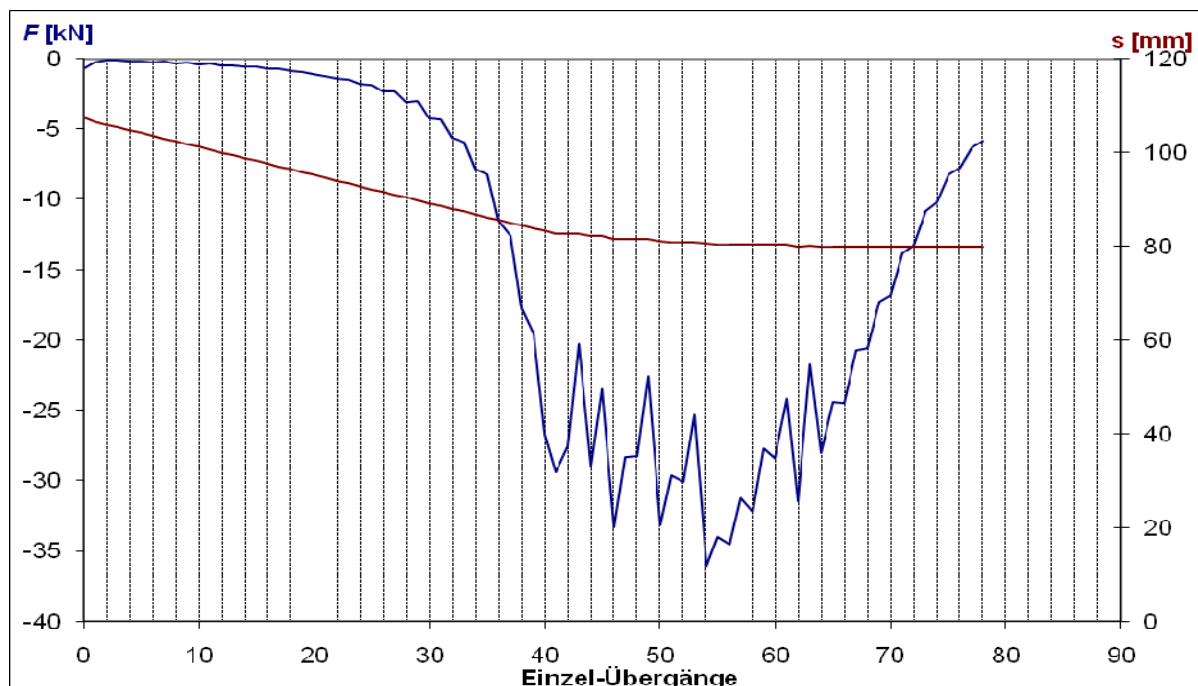
In figuur 4.2.1 is de verdichting in 2 fasen bij 140-150 graden Celsius weergegeven. Hierbij is te zien dat er ongeveer 12 kN nodig is om tot 84 mm te verdichten in 26 walsovergangen. Fase 2 heeft ongeveer 27,5 kN nodig om tot 80 mm te verdichten in 29 walsovergangen. De schokkerige krachtcurve ontstaat doordat de LVDT's even moeite hebben met het meten van de hoogte door het bewegen van de mal tijdens de verdichting.



Figuur 4.2.1: Verdichting in 2 fasen bij 140-150 graden Celsius

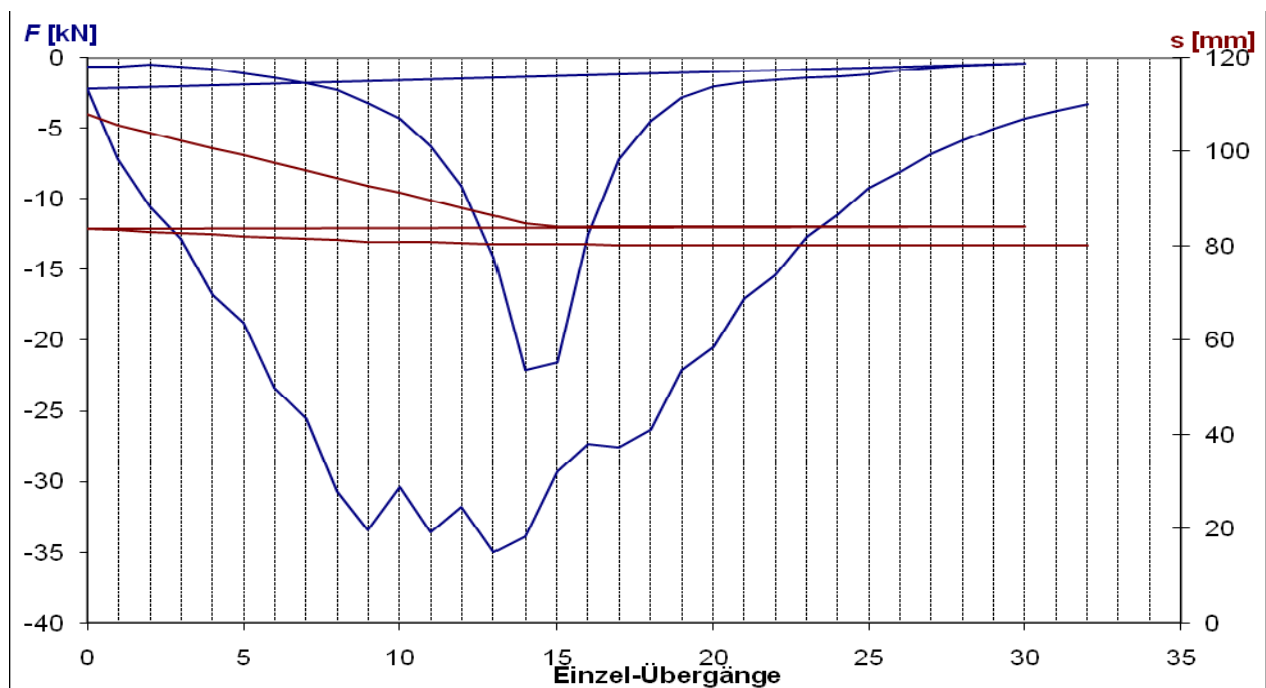
In figuur 4.2.2 is de verdichting in 1 fase bij 140-150 graden Celsius weergegeven. Hierbij is te zien dat er in begin relatief weinig kracht nodig is (tot 10 kN) met veel verdichtingsresultaat als gevolg. Hiervoor zijn relatief veel walsovergangen nodig, namelijk 36 walsovergangen. Vervolgens is er moeite om

tot 80 mm te verdichten (hetgeen te zien is aan de schokkerige krachtcurve) en hiervoor zijn nog eens 42 walsovergangen nodig met relatief erg veel kracht (tot 35 kN).



Figuur 4.2.2: Verdichting in 1 fase bij 140-150 graden Celsius

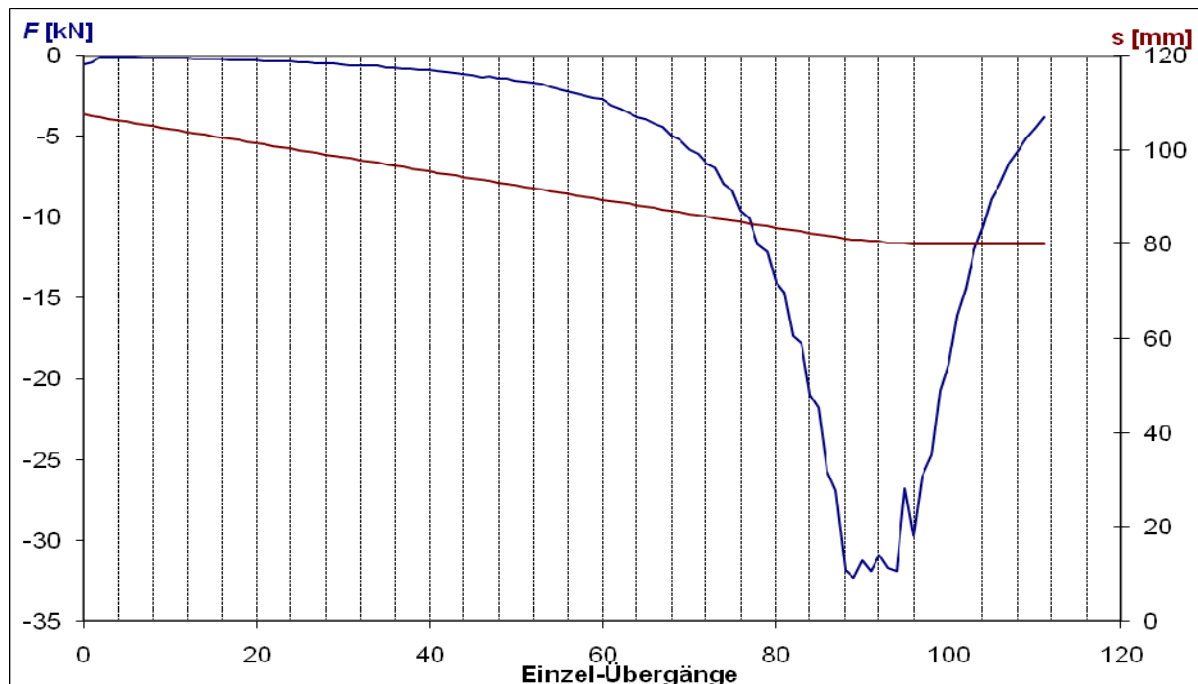
In figuur 4.2.3 is de verdichting in 2 fasen bij 100-110 graden Celsius weergegeven. Hierbij is te zien dat er ongeveer 22 kN nodig is om tot 84 mm te verdichten in 30 walsovergangen. Fase 2 heeft ongeveer 35 kN nodig om tot 80 mm te verdichten in 32 walsovergangen.



Figuur 4.2.3: Verdichting in 2 fasen bij 100-110 graden Celsius

In figuur 4.2.4 is de verdichting in 1 fase bij 100-110 graden Celsius weergegeven. Hierbij is te zien dat er in begin relatief weinig kracht nodig is (tot 10 kN) met veel verdichtingsresultaat als gevolg. Hiervoor zijn relatief veel walsovergangen nodig, namelijk 77 walsovergangen. Vervolgens is er moeite om

tot 80 mm te verdichten (hetgeen te zien is aan de schokkerige krachtcurve) en hiervoor zijn nog eens 44 walsovergangen nodig met relatief erg veel kracht (tot 35 kN).



Figuur 4.2.4: Verdichting in 1 fase bij 100-110 graden Celsius

Uit deze testen met de verdichtingsprocedures zijn de volgende conclusies getrokken:

- De vorm van beide grafieken is ongeveer gelijk. In het begin is relatief weinig kracht nodig om tot 84 mm te verdichten, daarna verloopt de verdichting van 84 mm naar 80 mm moeizaam. De methode voor het verdichten van het mengsel in 1 fase heeft daarentegen voor ongeveer hetzelfde resultaat veel meer walsovergangen nodig (bij 140-150 graden Celsius 23 walsovergangen meer en bij 100-110 graden Celsius 49 walsovergangen meer) en meer kracht nodig (bij 140-150 graden Celsius 7 kN meer en bij 100-110 graden Celsius is de kracht ongeveer gelijk);
- Krachten in de Freundl plaatverdichter die boven de 30 kN liggen (dit zijn lijnlasten 0,6 kN/cm) zijn in de praktijk vrijwel ondenkbaar (Mollenhauer, 2009), omdat er dan zo'n zware wals nodig is die in de praktijk niet verkrijgbaar is (een normale wals heeft een lijnlast van ongeveer 0,3 kN/cm). Daarnaast heeft methode 2 veel meer walsovergangen nodig om te verdichten, hetgeen ook onrealistisch lijkt.
- Ook wat betreft de cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie is er een groot verschil tussen de 2 methoden. In principe geldt; hoe minder kracht en energie nodig om te verdichten, des te beter. Bij 140-150 graden Celsius heeft methode 1 totaal 978 kN en 94 Nm nodig om te verdichten en methode 2 2402 kN en 156 Nm om te verdichten. Bij 100-110 graden Celsius heeft methode 1 1684 kN en 134 Nm nodig en methode 2 heeft 1830 kN en 162 Nm nodig om tot 80 mm te verdichten. Dit betekent dat ook wat betreft de cumulatieve kracht en de verdichtingsenergie de voorkeur uit gaat naar methode 1 (verdichten in 2 fasen).

Om deze redenen is ervoor gekozen om te verdichten in twee fasen met Freundl plaatverdichter. Daarnaast wordt in de literatuur ook geconstateerd dat het verdichtingsproces in meerdere fasen plaatsvindt, hetgeen besproken is in hoofdstuk 2; in de eerste fase vindt een korrelrangschikking plaats, in de tweede fase vindt de hoofdverdichting plaats en tijdens de derde fase vindt het afwalsen plaats (Van Stek en Linden, 1992; Ter Huerne, 2004; Ooms, 2008). In de Freundl plaatverdichter vinden fase 2 en 3 achter elkaar plaats door na het behalen van de eindhoogte nog 15 walsovergangen te laten plaatsvinden.

Op de Freundl plaatverdichter zijn verschillende instellingsmogelijkheden voor de positie-gestuurde verdichting mogelijk. De te kiezen instellingsvariabelen zijn (Wennigsen, 2008):

- Startlast tafelaandrijving (als lijnlast);
- Absolute startlast voor de tafelaandrijving;
- Verplaatsingsnelheid van de proefvorm;
- Pauze van de proefvorm bij richtingomkeer op tafelkeerpunt;
- Belastingssnelheid van de sector per afzonderlijke overgang;
- Maximale last;
- Eindhoogte van het proefstuk;
- Het aantal afzonderlijke overgangen met eindhoogte;
- Temperatuur proefvorm en walssegment.

Er is gekozen om de instellingen te baseren op de verdichtingsprocedure ontwikkeld door Dhr. Mollenhauer voor de verdichting van Duitse asfaltmengsels. Dit betekent dat er is gekozen voor een startlast van 0,04 kN/cm (als lijnlast) en een absolute startlast van 2,0 kN. De verplaatsingsnelheid van de proefvorm is gekozen op 240 mm per seconde met een pauze bij de richtingsomkeer op het tafelkeerpunt van 0,2 seconde. De belastingssnelheid van de sector per afzonderlijke overgang in de eerste fase is 1,60 mm en in de tweede fase 0,30 mm en beide fasen met een maximale last van 1,0 kN per centimeter, oftewel een maximale belasting van 50 kN voor een plaat van 50 cm. De eindhoogte van de eerste fase is gekozen op 84 mm en de eindhoogte na de tweede fase is 80 mm, de uiteindelijk beoogde hoogte van het proefstuk. Na het behalen van de eindhoogte zullen er nog 15 afzonderlijke walsovergangen plaatsvinden om het asfalt af te walsen, om de plaat te egaliseren en de kracht geleidelijk af te laten nemen. De temperatuur van de proefvorm en het walssegment is ingesteld op 80°C, de maximale temperatuur.

De eindhoogte van de eerste fase, 84 mm, is gebaseerd op 95% verdichting en de waarden 1,30 mm en 0,30 mm per overgang zijn gekozen op basis van ervaringen bij Ooms, zodat de beoogde dichtheden gehaald worden.

Kracht-gestuurde verdichting

Ook de kracht-gestuurde verdichting vindt om de beschreven redenen in een tweetal fasen plaats. Voor de kracht-gestuurde verdichting zijn een tweetal testen gedaan met verschillende walsenergie als verdichtingskracht:

- Verdichten met een maximale kracht van 15 kN (een lijnlast van 0,3 kN/cm);
- Verdichten met een maximale kracht van 30 kN (een lijnlast van 0,6 kN/cm).

Het doel van de kracht-gestuurde verdichting is om de verdichting, met realistische krachten uit de praktijk, te simuleren, terwijl de beoogde dichtheid behaald wordt. Deze krachten (15 en 30 kN) zijn gekozen, omdat Dhr. Mollenhauer een maximale kracht van 30 kN in zijn verdichtingsprocedures voor de Duitse bouwpraktijk voorschrijft, terwijl in de Nederlandse bouwpraktijk lijnlasten bijna niet groter zijn dan 15 kN.

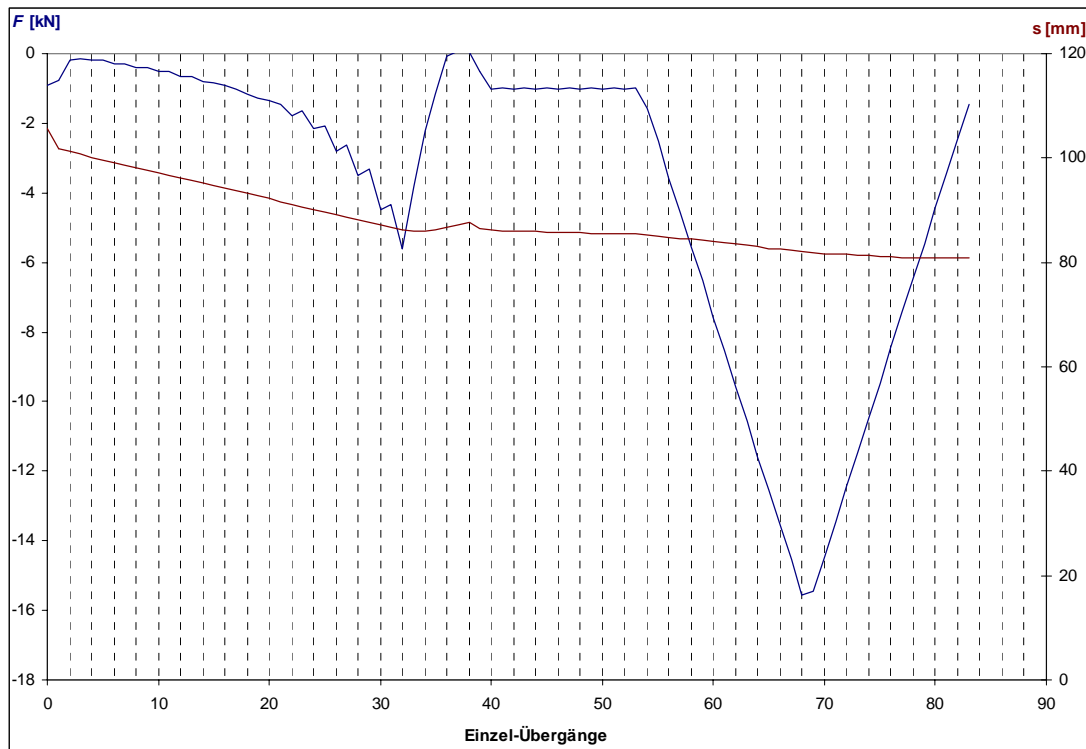
De resultaten van de twee testen zijn weergegeven in figuur 4.2.5 (maximale kracht van 15 kN) en figuur 4.2.6 (maximale kracht van 30 kN). Hierin is te zien dat de eindhoogte van beide asfaltplaten 81 mm is in ongeveer evenveel walsovergangen.

Verder zijn de dichtheden van de kernen per plaat bepaald. De kernen van beide platen hebben dichtheden variërend van 2350 kg/m² tot 2380 kg/m³ beide met een gemiddelde rond de 2370 kg/m³. Dit betekent dus dat beide platen de beoogde dichtheid hebben gehaald.

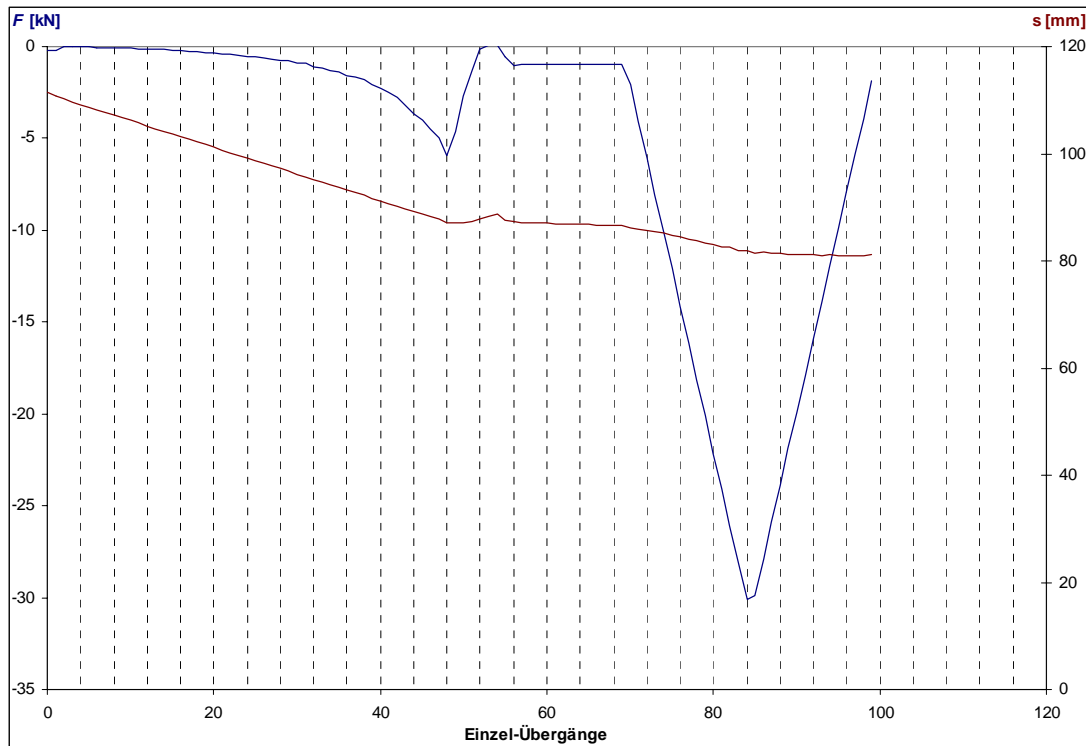
Ook zijn de lijnlasten die walsen over het algemeen uitoefenen beschouwd. Een normale wals is ongeveer 10.000 kg en heeft 2 walsrollen van 1,7 m breed. Dit betekent een lijnlast van 300 N/cm materiaal. In de Freundl plaatverdichter van 50 cm betekent dit dus een maximale lijnlast van 15 kN.

Verder zijn de walsfactoren (volgens formule F3.1) voor de beschouwde krachten berekend. Voor een normale wals uit de praktijk van 10.000 kg en een walsrol met een breedte van 1,7 m en een diameter van 1,1 m betekent dit een walsfactor van 24. Een maximale kracht van 15 kN in de Freundl plaatverdichter heeft een walsfactor van 24 en een maximale kracht van 30 kN in de Freundl plaatverdichter heeft een walsfactor van 49. De walsfactor van een maximale kracht van 15 kN in de Freundl plaatverdichter komt dus het meest overeen met de walsfactor van de praktijk.

Omdat de beoogde dichtheid wordt behaald, de kracht en de walsfactor het meest overeenkomen met de praktijk is ervoor gekozen om de kracht-gestuurde verdichting uit te voeren met een maximale kracht van 15 kN.



Figuur 4.2.5: Kracht-gestuurde verdichting tot 15 kN



Figuur 4.2.6: Kracht-gestuurde verdichting tot 30 kN

De instellingmogelijkheden bij de kracht-gestuurde verdichting op de Freundl plaatverdichter (ALP-A verdichting) zijn:

- Starthoogte waarop de verdichting moet beginnen (=vulhoogte);
- Verplaatsingsnelheid van proefvorm bij voorbelasting;
- Pauze bij richtingomkeer op tafelkeerpunt bij voorbelasting;
- Voorbelasting:
 - o Belastingsnelheid van de sector per afzonderlijk overgang;
 - o Voorcompressielast als lijnlast;
 - o Voorcompressielast absoluut;
 - o Aantal afzonderlijke overgangen met voorlast;
 - o Ontlastingsnelheid per afzonderlijke overgang;
 - o Verplaatsingsnelheid van proefvorm bij hoofdbelasting;
 - o Pauze bij richtingomkeer op tafelkeerpunt bij hoofdbelasting;
- Egaliseren:
 - o Verplaatsingsnelheid vorm voor hoofdcompressie;
 - o Pauze bij richtingomkeer op tafelkeerpunt;
 - o Belasting voor de egalisatiefase als lijnlast;
 - o Aantal afzonderlijke overgangen voor de egalisatiefase;
- Compressie:
 - o Aantal afzonderlijke overgangen tot aan eindlast;
 - o Hoofdcompressielast als lijnlast;
 - o Aantal afzonderlijke overgangen voor de ontlasting.

Wederom is er gekozen om de instellingen te baseren op de verdichtingsprocedure ontwikkeld door Dhr. Mollenhauer voor de verdichting van Duitse asfaltmengsels. De starthoogte is na voorverdichting 84 mm. Vervolgens is de verplaatsingsnelheid en de pauze bij de richtingomkeer van de proefvorm, zowel bij de voorverdichting als bij de hoofdverdichting, respectievelijk gekozen op 240 mm per 0,2 seconden, net zoals bij de positie-gestuurde verdichting.

De voorverdichting zal plaatsvinden over 20 walsovergangen, verdeeld in 10 walsovergangen met een oplopende kracht tot 5,0 kN en 10 walsovergangen om weer te ontlasten tot 0 kN. De belastingsnel-

heid per afzonderlijke walsovergang is dus gekozen op 0,5 mm, de voorcompressielast als lijnlast is gekozen op 0,1 kN per centimeter en dus is de absolute voorcompressielast 5,0 kN. Er zullen vervolgens 2 walsovergangen met de absolute lijnlast worden gedaan, waarbij vervolgens de ontlastingsnelheid op 0,5 mm per afzonderlijke walsovergang wordt ingesteld om na 10 walsovergangen weer op 0 kN uit te komen.

Vervolgens vindt de egalisatiefase plaats, waarbij het mengsel glad gemaakt wordt met een verplaat-singssnelheid van 0,02 kN per centimeter, oftewel een absolute lijnlast van 1,0 kN over 15 walsover-gangen.

Daarna vindt de hoofdverdichting plaats, waarbij over 15 walsovergangen een hoofdcompressielast van 0,05 kN per centimeter bereikt moet worden, hetgeen overeenkomt met een absolute lijnlast van 2,5 kN. Vervolgens vindt ook de ontlasting plaats over 15 walsovergangen en omdat dit gelijkwaardig gebeurt, gaat dit met een snelheid van 0,17 kN per walsovergang.

De temperatuur van de proefvorm en het walssegment is wederom ingesteld op 80°C, de maximale temperatuur.

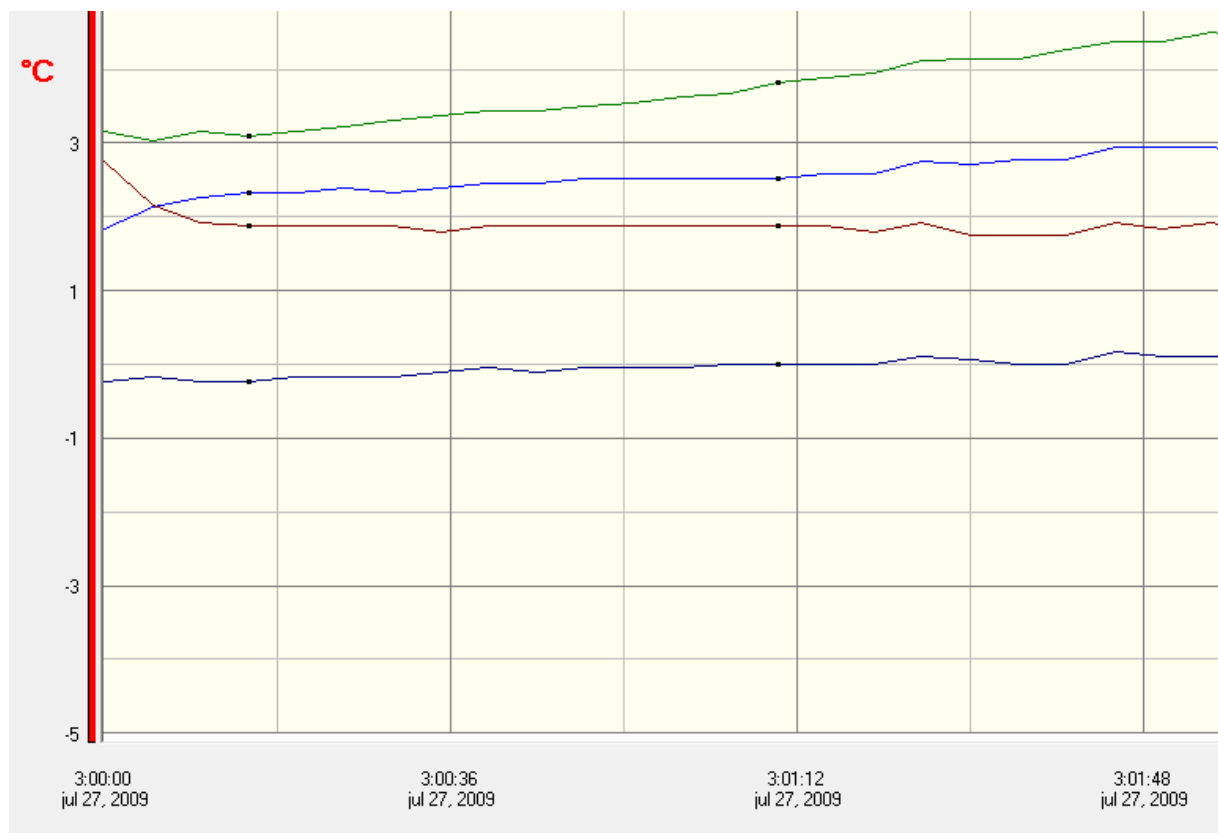
Bijlage 2.3: Kalibratie thermokoppels

Om te bepalen of de thermokoppels de juiste temperatuur meten (en doorgeven aan de pc) zijn de thermokoppels gekalibreerd. Tijdens het onderzoek zijn 2 dataloggers, één met 4 aansluitingen en één met 8 aansluitingen, gebruikt en beide dataloggers zijn gekalibreerd.

De thermokoppels zijn versimpeld gekalibreerd door de thermokoppels in kokend water te houden en in smeltend ijs. De temperatuur is met een gekalibreerde thermometer gecontroleerd.

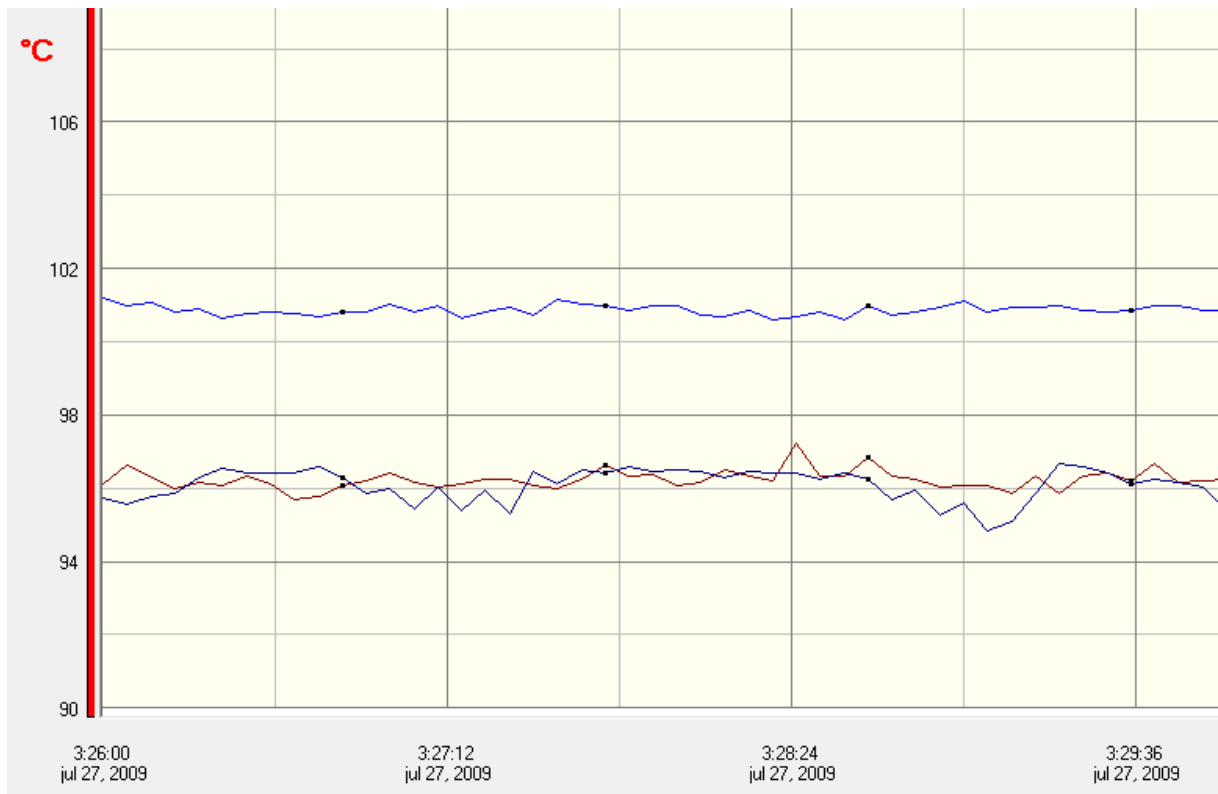
In figuur 4.3.1 is de kalibratie van de datalogger met de 4 aansluitingen in het smeltend ijs weergegeven. De gekalibreerde thermometer gaf bij het smeltend ijs een temperatuur van 1 graad Celsius aan.

De thermokoppels geven een range van +0,5 tot +3,5 graden Celsius. In figuur 4.3.2 is de kalibratie van de datalogger met de 4 aansluitingen in kokend water weergegeven. De gekalibreerde thermometer gaf een temperatuur van 97 graden Celsius aan. De thermokoppels geven een range van +95 tot +101 graden Celsius.

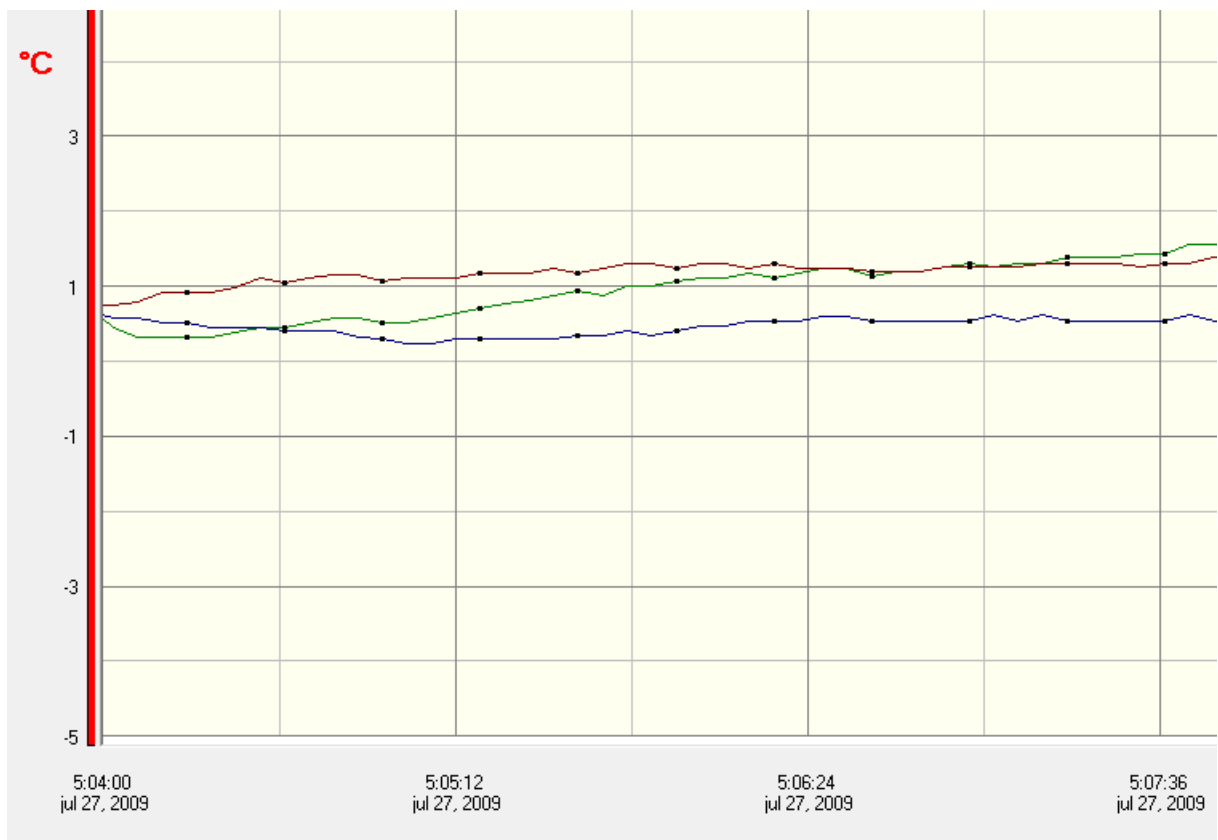


Figuur 4.3.1: Kalibratie datalogger met 4 aansluitingen in smeltend ijs

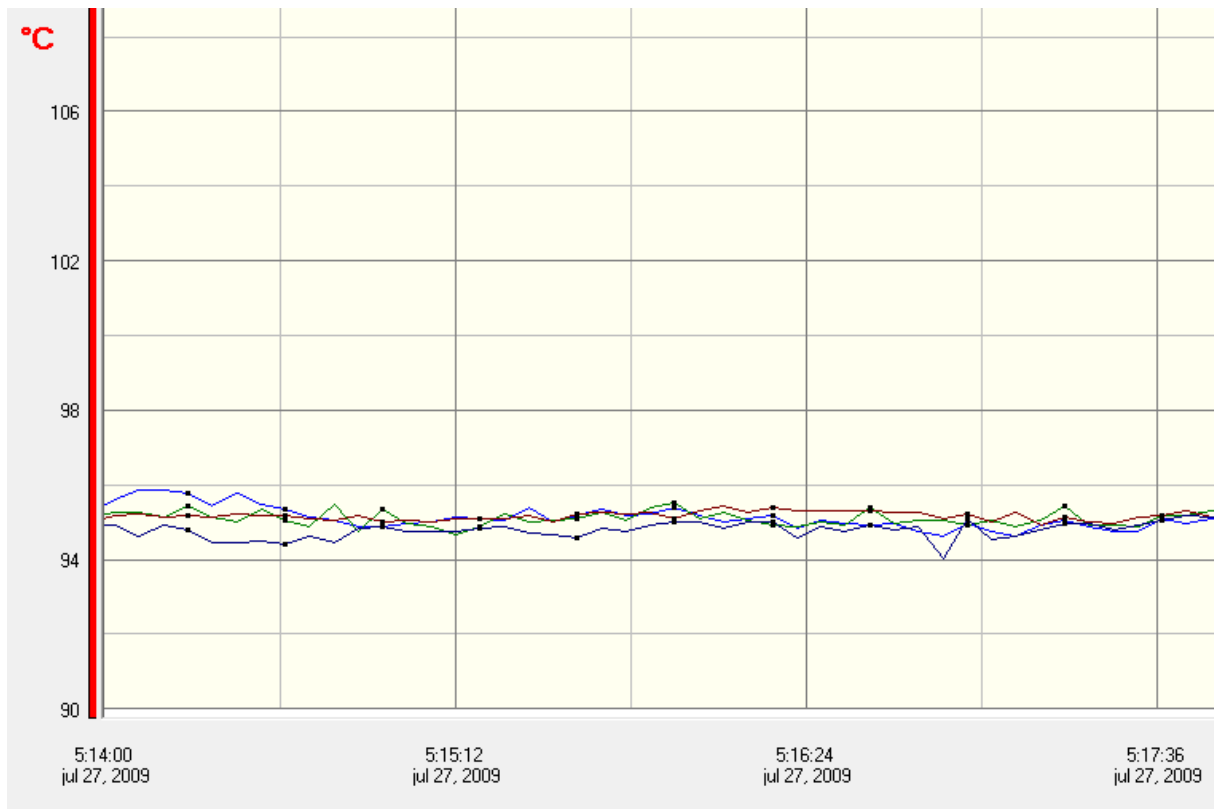
In figuur 4.3.3 is de kalibratie van de datalogger met de 8 aansluitingen in smeltend ijs weergegeven. De gekalibreerde thermometer gaf een temperatuur van 1 graad Celsius aan. De thermokoppels geven een range van +0,5 tot +2,5 graden Celsius. In figuur 4.3.4 is de kalibratie van de datalogger met de 8 aansluitingen in het kokend water weergegeven. De gekalibreerde thermometer gaf een temperatuur van 97 graden Celsius aan. De thermokoppels geven een range van +94,5 tot +95,5 graden Celsius.



Figuur 4.3.2: Kalibratie datalogger met 4 aansluitingen in kokend water



Figuur 4.3.3: Kalibratie 8 aansluitingen in smeltend ijs



Figuur 4.3.4: Kalibratie 8 aansluitingen in kokend water

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat de thermokoppels maximaal een afwijking hebben van 4 graden Celsius en de gemiddelde afwijking is 1,9 graad Celsius met een standaardafwijking van 1,2 graden Celsius. Voor dit onderzoek is dit voldoende, omdat in dit onderzoek niet het temperatuurvenster op één graad nauwkeurig wordt onderzocht, maar er wordt onderzocht of het fenomeen, dat de streefdichtheid wordt bereikt bij verschillende verdichtingstemperaturen maar verschillende mechanische eigenschappen tot gevolg heeft, voorkomt.

Daarnaast werd bij het testen de thermokoppel aan de onderkant van de asfaltlaag vastgemaakt aan de bodemplaat (van de mal). De thermokoppel mat automatisch de temperatuur van de bodemplaat (80°C) en niet de temperatuur in de onderste centimeter van het asfaltmengsel. Daarom is bij de volgende platen de thermokoppel werkelijk in de onderkant van de asfaltlaag gestoken en niet vastgemaakt aan de onderkant van de bodemplaat van de mal.

Bijlage 2.4: Toetsing betrouwbaarheid proeven

Voor de interpretatie van de resultaten van de positie- en kracht-gestuurde verdichting is het van belang om te bepalen in hoeverre de belangrijkste variabelen variëren en dat de variatie dus niet kleiner dan de toevalsfactor is. De aanpak om deze variabiliteit te bepalen is met behulp van statistiek door het beschouwen van de spreiding en de (on)betrouwbaarheid.

In dit onderzoek wordt het belangrijk geacht om een kleine spreiding, en daarmee hoge betrouwbaarheid, bij de variabelen dichtheid, temperatuur en bitumeneigenschappen te hebben. De toetsing van de spreiding en de betrouwbaarheid van deze variabelen is vooraf gedaan voor de bepaling van het aantal proeven (deel 1) en achteraf (voor de positie- en kracht gestuurde verdichting) om te bepalen of variabiliteit van de resultaten aanvaardbaar is (deel 2 en 3).

1. Toetsing vooraf

Vooraf werd verwacht dat de temperatuur en de viscositeit relatief weinig spreiding zouden vertonen, waardoor vooraf de spreiding van de dichtheid als maatgevend is aangenomen voor het bepalen van het aantal proeven.

Vooraf zijn er twee datasets van 24 dichtheidsmetingen van Ooms beschouwd van de verdichting van een STAB 0/16 met de Freundl plaatverdichter. Het gemiddelde van de eerste dataset is 2363 kg/m³ met een standaardafwijking van 9 kg/m³. De tweede dataset heeft een gemiddelde van 2374 kg/m³ met een standaardafwijking van 13 kg/m³.

Omdat het aantal gemeten waarden per proef relatief laag is, is het moeilijk om verschillen in spreiding en gemiddelde aan te tonen. Daarom zullen idealiter de resultaten van de twee datasets tot één dataset gesommeerd en gewogen moeten worden om het aantal waarnemingen te vergroten. Hierbij zal getoetst moeten worden of de gemiddelden en de standaardafwijkingen onderling van elkaar verschillen, hetgeen gedaan kan worden met de χ^2 -toets (voor gemiddelden) en de F-toets (voor standaardafwijkingen). Nu wordt er aangenomen dat deze niet verschillen, omdat het aantal waarnemingen klein is, waardoor de factor die de gemiddelden en standaardafwijkingen van elkaar mogen verschillen erg groot is om een verschil aan te kunnen tonen, en die factor is in dit geval niet zo groot. Er is dus geen reden om aan te nemen dat deze datasets van elkaar verschillen, waardoor de twee datasets als één dataset beschouwd mogen worden. Hierbij kunnen de gemiddelden normaal (rekenkundig) gemiddeld worden en worden de standaardafwijkingen gewogen gemiddeld met formule 4.4.1.

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{F4.4.1}$$

$$S_p^2 = 125,0$$

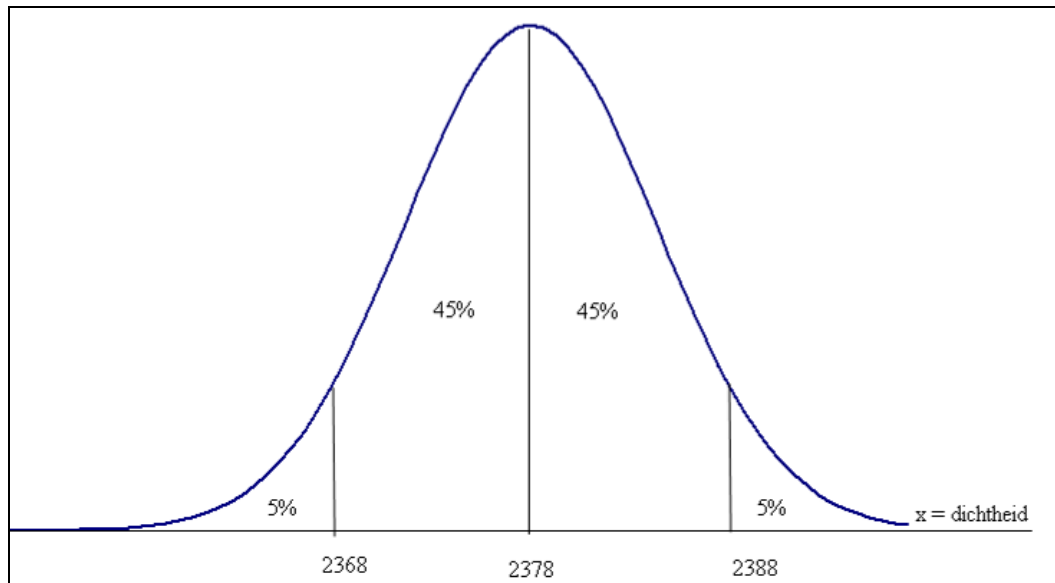
Waarbij:

S_p = gewogen standaardafwijking

$n_{1,2}$ = aantal waarnemingen

$S_{1,2}$ = standaardafwijking

Nu is er dus één dataset met een gemiddelde van 2368 kg/m³ en een standaardafwijking van 11,2 kg/m³ beschouwd. Volgens de norm zijn de boven- en ondergrens plus en min 30 kg/m³ ten opzichte van de beoogde dichtheid (2360 kg/m³), maar binnen dit onderzoek is minder variabiliteit gewenst. Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de dichtheid niet meer dan 10 kg/m³ verschilt ten opzichte van de gemiddelde dichtheid. In dit geval betekent dat dus een bovengrens van 2378 kg/m³ en een ondergrens van 2358 kg/m³. Daarbij wordt 90% betrouwbaarheid beoogd dat deze grenzen niet overschreden zullen worden. Het beoogde doel in dit onderzoek van de dichtheid is schematisch weergegeven in figuur 4.4.1.



Figuur 4.4.1: Schematische weergave van de beoogde variabiliteit van de dichtheid

Met deze gegevens kan het aantal proeven vooraf worden berekend met formule 4.6.

$$Z_{90\%} = \frac{x - m}{\frac{\sqrt{S_p^2}}{\sqrt{n}}} \quad \text{F4.6}$$

$$1,645 = \frac{2368 - 2378}{\frac{\sqrt{125,0}}{\sqrt{n}}}$$

$$n = 3$$

Waarbij:

Z = gestandaardiseerde waarde normale verdeling

x = variabele

μ = gemiddelde van de populatie

σ = standaardafwijking van de populatie

n = aantal proeven

Er zullen dus minimaal drie proeven gedaan moeten worden op basis van deze berekeningen om met een onbetrouwbaarheidsdrempel van 10% te laten zien dat de spreiding niet meer is dan 10 kg/m³ is. Daarom zullen er drie asfaltplaten per beoogde verdichtingstemperatuur worden gemaakt.

2. Toetsing positie gestuurde verdichting

Na de toetsing vooraf worden de parameters dichtheid, temperatuur en viscositeit van de positie gestuurde verdichting op hun werkelijke variabiliteit getoetst. Nu wordt er aangenomen dat deze variabelen normaal verdeeld zijn en dan stelt de statistiek wanneer er een aselechte steekproef uit een populatie met een normale verdeling wordt genomen, dat de kansverdeling van het gemiddelde van de steekproef ook normaal verdeeld zal zijn. Daarnaast is de steekproef vrij klein, zodat de standaardafwijking een slechte benadering van de standaardafwijking van de populatie kan zijn. De oplossing voor dit probleem is het vervangen van de standaardnormale steekproefgrootte door de studentverdeelde steekproefgrootte, waarbij de standaardafwijking van de steekproef de standaardafwijking van de populatie vervangt (McClave et al., 2007).

Er zal getoetst worden met behulp van een betrouwbaarheidsinterval. Het bepalen van dit betrouwbaarheidsinterval is gedaan met behulp van formule 4.4.2.

$$BI : \bar{x} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

F4.4.2

Waarbij:

BI = betrouwbaarheidsinterval

X = gemiddelde van de steekproef

t = studentverdeling

α = onbetrouwbaarheid

s = standaardafwijking van de steekproef

n = aantal waarnemingen van de steekproef

Dit interval moet als volgt geïnterpreteerd worden; Het is voor $(1-\alpha)\%$ zeker dat de variabele ligt tussen BI(min) en BI(max). Achtereenvolgens zal de toetsing van de variabelen dichtheid, temperatuur en viscositeit van de positie gestuurde verdichting worden besproken.

Dichtheid

Uit de twaalf platen zijn negen boorkernen geboord waarvan de dichtheid is bepaald. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 8 vrijheidsgraden) per plaat zijn weergegeven in tabel 4.4.1.

Tabel 4.4.1: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de dichtheid (kg/m^3) per plaat

Plaat	Gemiddelde dichtheid	Standaardafwijking dichtheid	BI (min)	BI (max)
1	2363	9	2358	2369
4	2355	12	2348	2362
9	2390	9	2384	2395
5	2367	11	2361	2374
7	2356	15	2347	2365
8	2333	10	2326	2339
10	2386	8	2381	2391
11	2398	8	2393	2403
12	2391	10	2385	2397
13	2381	8	2377	2386
14	2367	11	2360	2374
15	2368	4	2366	2371

Volgens de norm mag de dichtheid 30 kg/m^3 ten opzichte van de boogde dichtheid verschillen, maar binnen dit onderzoek is minder variabiliteit gewenst. Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de dichtheid niet meer dan 10 kg/m^3 verschilt ten opzichte van de gemiddelde dichtheid van de plaat. Aan de hand van tabel 4.4.1 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsinterval bij alle platen binnen de norm van plus of min 10 kg/m^3 ten opzichte van de gemiddelde dichtheid valt.

Temperatuur

Per plaat is de temperatuur van onderkant, het midden en de bovenkant van de asfaltlaag bepaald. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 2 vrijheidsgraden) per plaat zijn weergegeven in tabel 4.4.2.

Tabel 4.4.2: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de temperatuur (°C) per plaat

Plaat	Gemiddelde temperatuur	Standaardafwijking temperatuur	BI (min)	BI (max)
1	170	4	167	174
4	166	4	162	169
9	158	2	157	160
5	149	8	141	157
7	139	8	131	146
8	126	6	120	132
10	104	6	99	109
11	102	4	98	106
12	98	6	93	104
13	92	4	88	96
14	82	5	77	87
15	80	7	73	88

Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de temperatuur niet meer dan 10 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van de plaat. Aan de hand van tabel 4.4.2 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsinterval bij alle platen binnen de norm van plus of min 10 °C ten opzichte van de gemiddelde temperatuur valt.

Bitumeneigenschappen

In het STAB 0/16 mengsel wordt gebruik gemaakt van een 40/60 bitumen. Hiervan zijn een drietal penetratieproeven en een drietal ring&kogelproeven gedaan om de spreiding van deze bitumeneigenschappen te bepalen. De resultaten van deze proeven zijn weergegeven in bijlage 2.5. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 2 vrijheidsgraden voor de penetratie en 1 vrijheidsgraad voor de ring&kogel) per monster zijn weergegeven in tabel 4.4.3.

Tabel 4.4.3: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de bitumeneigenschappen per plaat

Penetratie				
Monster	gemiddelde penetratie	Standaardafwijking penetratie	BI (min)	BI (max)
1	52,3	0,6	51,8	52,9
2	52,7	0,6	52,1	53,2
3	52,3	2,5	49,9	54,8
Ring&Kogel				
Monster	gemiddelde ring&kogel	Standaardafwijking ring&kogel	BI (min)	BI (max)
1	50,9	0,1	50,6	51,2
2	51,3	0,1	51,1	51,4
3	50,8	0,2	50,3	51,2

Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de penetratie niet meer dan 4,0 dmm verschilt ten opzichte van de gemiddelde penetratie van het monster en de ring&kogel niet meer dan 1,0 °C verschikt ten opzichte van de gemiddelde ring&kogel van het monster. Aan de hand van tabel 4.4.3 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsintervallen bij alle monsters binnen de normen vallen.

3. Toetsing kracht gestuurde verdichting

In dit deel zullen de parameters dichtheid, temperatuur en viscositeit van de kracht gestuurde verdichting op hun werkelijke variabiliteit worden getoetst. Wederom wordt er aangenomen dat deze variabelen normaal verdeeld zijn, waarbij getoetst is met behulp van het betrouwbaarheidsinterval uit formule 4.4.2. Achtereenvolgens zal de toetsing van de variabelen dichtheid, temperatuur en viscositeit van de kracht gestuurde verdichting worden besproken.

Dichtheid

Uit de zes platen zijn negen boorkernen geboord waarvan de dichtheid is bepaald. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 8 vrijheidsgraden) per plaat zijn weergegeven in tabel 4.4.4.

Tabel 4.4.4: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de dichtheid (kg/m^3) per plaat

Plaat	Gemiddelde dichtheid	Standaardafwijking dichtheid	BI (min)	BI (max)
19	2351	8	2346	2356
20	2349	10	2343	2355
21	2372	14	2364	2381
22	2370	11	2363	2376
23	2340	8	2335	2345
24	2357	8	2352	2362

Volgens de norm mag de dichtheid 30 kg/m^3 ten opzichte van de boogde dichtheid verschillen, maar binnen dit onderzoek is minder variabiliteit gewenst. Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de dichtheid niet meer dan 10 kg/m^3 verschilt ten opzichte van de gemiddelde dichtheid van de plaat. Aan de hand van tabel 4.4.4 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsinterval bij alle platen binnen de norm van plus of min 10 kg/m^3 ten opzichte van de gemiddelde dichtheid valt.

Temperatuur

Per plaat is de temperatuur van onderkant, het midden en de bovenkant van de asfaltlaag bepaald. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 2 vrijheidsgraden) per plaat zijn weergegeven in tabel 4.6.

Tabel 4.4.5: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) per plaat

Plaat	Gemiddelde temperatuur	Standaardafwijking temperatuur	BI (min)	BI (max)
19	138	8	131	146
20	140	4	136	144
21	88	7	81	95
22	89	9	81	97
23	169	5	165	173
24	166	6	160	171

Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de temperatuur niet meer dan 10°C verschilt ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van de plaat. Aan de hand van tabel 4.4.5 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsinterval bij alle platen binnen de norm van plus of min 10°C ten opzichte van de gemiddelde temperatuur valt.

Bitumeneigenschappen

In het STAB 0/16 mengsel wordt gebruik gemaakt van een 40/60 bitumen. Hiervan zijn een drietal penetratieproeven en een drietal ring&kogelproeven gedaan om de spreiding van deze bitumeneigenschappen te bepalen. De resultaten van deze proeven zijn weergegeven in bijlage 2.5. De gemiddelden, standaardafwijkingen en de betrouwbaarheidsintervallen (met een onbetrouwbaarheid van 0,1 en 2 vrijheidsgraden voor de penetratie en 1 vrijheidsgraad voor de ring&kogel) per monster zijn weergegeven in tabel 4.4.6.

Tabel 4.4.6: Gemiddelde, standaardafwijking en betrouwbaarheidsinterval van de bitumeneigenschappen per plaat

Penetratie				
Monster	gemiddelde penetratie	Standaardafwijking penetratie	BI (min)	BI (max)
1	52,3	0,6	51,8	52,9
2	53,3	0,6	52,8	53,9
3	54,7	0,6	54,1	55,2
Ring&Kogel				
Monster	gemiddelde ring&kogel	Standaardafwijking ring&kogel	BI (min)	BI (max)
1	50,0	0,3	49,4	50,6
2	50,4	0,1	50,1	50,7
3	49,8	0,1	49,6	49,9

Binnen dit onderzoek is het doel dat in 90% van de gevallen de penetratie niet meer dan 4,0 dmm verschilt ten opzichte van de gemiddelde penetratie van het monster en de ring&kogel niet meer dan 1,0 °C verschilt ten opzichte van de gemiddelde ring&kogel van het monster. Aan de hand van tabel 4.4.6 kan geconcludeerd worden dat het betrouwbaarheidsintervallen bij alle monsters binnen de normen vallen.

Bijlage 2.5: Resultaten penetratieproeven en Ring&kogelproeven

Omdat bitumen een thermoplastisch karakter heeft is het noodzakelijk om de consistentie van de bitumen door meting vast te leggen. Hiervoor zijn een tweetal empirische methoden beschikbaar; de bepaling van de penetratie en de bepaling van het verwekingspunt Ring&Kogel. Bij de bepaling van de penetratie worden bij een vastgestelde temperatuur (25 °C) consistenties weergegeven door de mate van indringing (in 0,1 mm) van een naald (100 gram) gedurende een bepaalde tijd (5 seconden). Het verwekingspunt Ring&Kogel geeft de temperatuur aan waarbij het bitumen onder een voorgeschreven belasting een bepaalde vervorming vertoont (op het moment waarop een kogeltje door het verweken van het bitumen door een met bitumen gevuld ringetje zakt en het monsternormaal de bodemplaat raakt). Een lage penetratie (respectievelijk een hoog verwekingspunt) duiden op een harde bitumen. Vervolgens kan met behulp van de penetratie en het verwekingspunt Ring&Kogel de temperatuurgevoeligheid van de bitumen worden uitgedrukt in één getal door middel van de penetratie-index (P.I.). De temperatuurgevoeligheid neemt af bij stijging van de P.I.

De proeven zijn uitgevoerd volgens de NEN-normen (de penetratieproef volgens NEN-EN 1426 en de Ring&Kogelproef volgens NEN-EN 1427). De P.I. is berekend volgens formule F.1. (VBW-asfalt, 2000).

$$p.i. = \frac{20t_v + 500 \log pen - 1952}{t_v - 50 \log pen + 120} \quad \text{F.1}$$

Waarbij:

p.i. = penetratie-index

t_v = verwekingspunt (graden Celsius)

pen = penetratiewaarde (in 0,1 mm)

Achtereenvolgens worden de resultaten van de positie gestuurde verdichting en kracht gestuurde verdichting beschreven.

Bitumeneigenschappen positie gestuurde verdichting

De resultaten van de penetratieproeven en de Ring&Kogelproeven zijn weergegeven in figuur 4.5.1. Aan de hand van de resultaten is te zien dat de penetratie-waarden tussen de 40 en de 60, zoals aangegeven door de bitumenleverancier, liggen. Een andere eis aan de penetratie-waarden is dat de onderlinge waarden bij penetratiewaarden tussen de 50 en 149 maximaal 4 mogen verschillen. Het maximale verschil bij de resultaten van deze proeven is 3, dus ook binnen de grenzen van deze eis vallen de bitumen.

De resultaten van de Ring&Kogelproeven variëren van 50,8 tot 51,2 graden Celsius. Voor de Ring&Kogel proeven geldt de eis dat deze onderling (dus van de 2 ring en kogels onderling van 1 proef) niet meer mogen verschillen dan 1,0 graad Celsius. In dit geval is het maximale verschil 0,3 graden Celsius, en dus voldoen de Ring&Kogelresultaten aan deze eis.

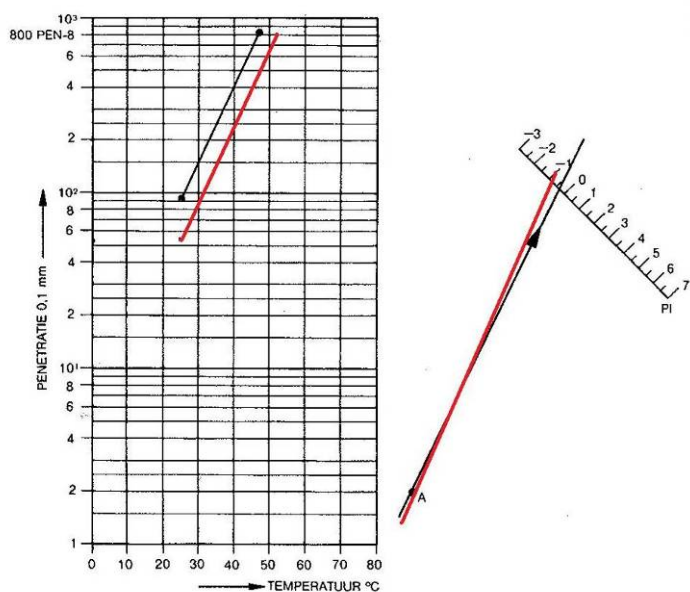
Volgens de literatuur (VBW-asfalt, 2000) dienen de penetratiewaarden tussen de 40 en de 60 te liggen. Voor de Ring&Kogelproeven geeft VBW-asfalt (2000) waarden aan tussen de 48 en 56. Voor beide proeven geldt dat de resultaten binnen deze waarden uit de literatuur liggen.

Volgens VBW-asfalt (2000) ligt de P.I. van een 40/60 bitumen tussen de -1,5 en +0,7. De P.I. is berekend volgens formule F.1 en bepaald met behulp van het nomogram van figuur 4.5.2 en voor deze resultaten betekent dit een P.I. van -0,8. Dit valt dus binnen de aangegeven range van VBW-asfalt (2000).

Monstergegevens							
Codering:	SC-09-42	Projectnummer: 460003-04					
Omschrijving:	40/60						
Herkomst:	Schagen						
Hoeveelheid:	2,5 L						
Staat:	vers / teruggewonnen / verouderd, volgens:						
Opmerkingen:							
Monstervoorbereiding							
Laborant:FB	Datum: 23-07-2009	Norm: NEN-EN 12594:1999					
Oventemperatuur: 155	Oven: V15	Thermometer:					
Opmerkingen:							
Penetratie							
Laborant:	Datum:	Norm: NEN-EN 1426:1999					
Test temperatuur: °C	Waterbad:	Vulring: ja / nee	Penetrometer: P-01				
Bepaling	Tijdstip		Meetwaarden [0,1 mm]				Resultaat [0,1 mm]
	Vullen	Uitvoering	52	53	50		
1	0920	1225	52	53	50	51.7	
2	0920	1225	52	52	55	53.0	
3	0920	1225	53	53	52	52.7	
Opmerkingen:							
Verwekingspunt							
Laborant:	Datum:	Norm: NEN-EN 1427:1999					
Apparaat: R-06 (automatisch R&K apparaat)	Vloeistof: water / glycerine						
Bepaling	Tijdstip		Ring 1 [°C]	Ring 2 [°C]	Resultaat [°C]		
	Vullen ringen	Uitvoering					
1	0915	1120	51.0	50.8	51.0		
2	0915	1200	51.2	51.3	51.2		
3	0915	1217	50.6	50.9	50.8		
Opmerkingen:							
Breekpunt van Fraaß							
Laborant:	Datum:	Norm: NEN-EN 12593:1999					
Fraaß apparaat: F-01	Thermometer:						
Bepaling	Tijdstip		Aanvang buigen [°C]	Breekpunt [°C]	Resultaat [°C]		
	Aanbrengen	Uitvoering					
1							
2							
3							
4							
5							
Opmerkingen:							

Figuur 4.5.1: Resultaten bitumenproeven

Bepaling uit nomogram



Figuur 4.5.2: Bepaling P.I. volgens nomogram

Bitumeneigenschappen kracht gestuurde verdichting

De resultaten van de penetratieproeven en de Ring&Kogelproeven zijn weergegeven in figuur 4.5.3. Aan de hand van de resultaten is te zien dat de penetratie-waarden tussen de 40 en de 60, zoals aangegeven door de bitumenleverancier, liggen. Een andere eis aan de penetratie-waarden is dat de onderlinge waarden bij penetratiewaarden tussen de 50 en 149 maximaal 4 mogen verschillen. Het maximale verschil bij de resultaten van deze proeven is 1, dus ook binnen de grenzen van deze eis vallen de bitumen.

De resultaten van de Ring&Kogelproeven variëren van 49,7 tot 50,5 graden Celsius. Voor de Ring&Kogel proeven geldt de eis dat deze onderling (dus van de 2 ring en kogels onderling van 1 proef) niet meer mogen verschillen dan 1,0 graad Celsius. In dit geval is het maximale verschil 0,4 graden Celsius, en dus voldoen de Ring&Kogelresultaten aan deze eis.

Volgens de literatuur (VBW-asfalt, 2000) dienen de penetratiewaarden tussen de 40 en de 60 te liggen. Voor de Ring&Kogelproeven geeft VBW-asfalt (2000) waarden aan tussen de 48 en 56. Voor beide proeven geldt dat de resultaten binnen deze waarden uit de literatuur liggen.

Volgens VBW-asfalt (2000) ligt de P.I. van een 40/60 bitumen tussen de -1,5 en +0,7. De P.I. is berekend volgens formule F.1 en bepaald met behulp van het nomogram van figuur 4.3.2 en voor deze resultaten betekent dit een P.I. van -0,8. Dit valt dus binnen de aangegeven range van VBW-asfalt (2000).

Monstergegevens						
Codering:	SC-09-42		Projectnummer: 460003-04			
Omschrijving:	40/60					
Herkomst:	Schagen					
Hoeveelheid:	2,5 L					
Staat:	vers / teruggewonnen / verouderd, volgens:					
Opmerkingen:						
Monstervoorbereiding						
Laborant:FB	Datum:16-09-2009		Norm: NEN-EN 12594:1999			
Oventemperatuur: 155	Oven: V15		Thermometer:			
Opmerkingen:						
Penetratie						
Laborant:	Datum:		Norm: NEN-EN 1426:1999			
Test temperatuur: °C	Waterbad:		Vulring: ja / nee		Penetrometer: P-01	
Bepaling	Tijdstip		Meetwaarden [0,1 mm]			Resultaat [0,1 mm]
	Vullen	Uitvoering				
1	1115	1440	53	52	52	52.3
2	1115	1445	54	53	53	53.3
3	1115	1450	55	54	55	54.7
Opmerkingen:						
Verwekingspunt						
Laborant:	Datum:		Norm: NEN-EN 1427:1999			
Apparatuur: R-06 (automatisch R&K apparaat)	Vloeistof: water / glycerine					
Bepaling	Tijdstip		Ring 1 [°C]	Ring 2 [°C]	Resultaat [°C]	
	Vullen ringen	Uitvoering				
1	1115	1232	50.2	49.8	50.0	
2	1115	1300	50.5	50.3	50.4	
3	1115	1325	49.8	49.7	49.8	
Opmerkingen:						
Breekpunt van Fraaß						
Laborant:	Datum:		Norm: NEN-EN 12593:1999			
Fraaß apparaat: F-01	Thermometer:					
Bepaling	Tijdstip		Aanvang buigen [°C]	Breekpunt [°C]	Resultaat [°C]	
	Aanbrengen	Uitvoering				
1						
2						
3						
4						
5						
Opmerkingen:						

Figuur 4.5.3: Resultaten bitumenproeven