



**Opzoekingscentrum
voor de Wegenbouw**

Samen voor duurzame wegen

Handleiding

Handleiding voor het ontwerp van bitumineuze mengsels



Aanbevelingen

A 105

Sinds 1952 staat OCW (Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw) als onpartijdig onderzoekscentrum ten dienste van alle partners in de Belgische wegenbranche. OCW deelt zijn kennis met professionals uit de wegenbranche onder meer door middel van zijn publicaties (handleidingen, syntheses, researchverslagen, meetmethoden, informatiebladen, OCW Newsletters en Dossiers, activiteitenverslagen). Onze publicaties worden in het binnen- en buitenland op ruime schaal verspreid bij centra voor wetenschappelijk onderzoek, universiteiten, openbare instellingen en internationale instituten. Meer informatie over onze publicaties en activiteiten: www.ocw.be.

Handleiding voor het ontwerp van bitumineuze mengsels

Handleiding voor het ontwerp van bitumineuze mengsels / Opzoekingscentrum
voor de Wegenbouw

Brussel: OCW, 2022, 110 blz. (Aanbevelingen, ISSN 1376-9332; A 105).
Wettelijk depot: D/2022/0690/2

Verantwoordelijke uitgever: Annick De Swaef, Woluwedal 42, 1200 Brussel

© OCW – Alle rechten voorbehouden.

Auteur

J. De Visscher

Leescomité

Deze handleiding kwam tot stand in samenwerking met een leescomité, samengesteld uit leden met een bijzondere expertise op het gebied van bitumineuze mengsels en mengselontwerp:

Karolien Couscheir	(Universiteit Antwerpen)
Alexandra Destrée	(OCW)
Chantal Flemal	(SPW)
Pierre Hontoy	(SPW)
Philippe Keppens	(AWV)
Joke Laermans	(Colas Belgium)
Pierre-Paul Modde	(C.O.R.C.)
Tine Tanghe	(OCW)
Jordy Van Dam	(COPRO)
Pieter Van der Sypt	(Willemen Infra)
Ann Vanelstraete	(OCW)

Dankbetuiging

Het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw dankt de leden van het leescomité van harte voor hun medewerking. De vele waardevolle commentaren en suggesties hebben ertoe bijgedragen dat deze handleiding zo goed mogelijk aansluit bij de verwachtingen van de hele asfaltsector.

Bericht aan de lezer

Hoewel deze handleiding met de grootst mogelijke zorg is opgesteld, zijn onvolkomenheden nooit uit te sluiten. OCW en de personen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, kunnen geenszins aansprakelijk worden gesteld voor de verzamelde en verstrekte informatie, die louter als documentatie en zeker niet voor contractueel gebruik is bedoeld.



Inhoud

1. Inleiding	4
1.1 Bitumineuze mengsels en mengselontwerp	4
1.2 Prestatievereisten en prestatiekenmerken	4
1.3 Het belang van mengselontwerp	5
1.4 Overzicht van deze handleiding	7
2. Indeling van bitumineuze mengsels	8
2.1 Steen-, zand- en vulstofskelet	8
2.2 Continue en discontinue korrelverdeling	10
2.3 Gesloten en open mengsels	12
3. Rol en kenmerken van de bestanddelen	14
3.1 Steenslag	14
3.2 Zanden	15
3.3 Vulstoffen	16
3.4 Bindmiddelen	17
3.5 Asfaltgranulaat	19
3.6 Additieven	21
4. Theoretisch mengselontwerp	22
4.1 Formulering in volumedelen	22
4.2 Berekening van de holle ruimte in het mineraal aggregaat	25
4.3 Bindmiddelvolume en holle ruimte	29
4.4 Belang van de mastiekstijfheid	30
4.5 Volumetrische optimalisatie	32
5. Procedure voor mengselontwerp	34
5.1 Kenmerking en keuze van de bestanddelen	35
5.2 Samenstelling van het aggregaat	37
5.3 Bindmiddelgehalte	41
5.4 Experimentele verificatie van de holle ruimte	46
5.5 Experimentele verificatie van de mengselprestaties	47
6. Impact van bestanddelen en volumetrie op mengselprestaties	48
6.1 Verwerkbaarheid en verdichtbaarheid	48
6.2 Stijfheid	50
6.3 Spoorvormingsweerstand	52
6.4 Watergevoeligheid	54
6.5 Vermoeiingsweerstand	55
6.6 Rafelingsweerstand	56
6.7 Samenvatting	57

7. Praktische voorbeelden	60
7.1 Mengselontwerp SMA	60
7.2 Mengselontwerp AVS	66
8. Bijsturing van het mengselontwerp	72
8.1 Herziening van een bestaand mengselontwerp	72
8.2 Inschatting van de impact van variaties tijdens de productie	73
8.3 Verbetering van de verwerkbaarheid bij de uitvoering	77
Literatuur	
Bijlagen	84
Bijlage 1: Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze mengsels	86
Bijlage 2: Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze bindmiddelen	92
Bijlage 3: Mengselontwerp in geval van poreuze aggregaten	96

Lijst van de figuren

Figuur 1.1	Theoretisch mengselontwerp als onderdeel van het ontwerpproces	5
Figuur 2.1	Illustratie van de families bitumineuze mengsels volgens soort skelet	7
Figuur 2.2	Indeling volgens mineraal skelet door middel van zeefdriehoek (grenslijnen getekend voor een gemiddelde holle ruimte van 40 % voor de steenfractie, 35 % voor de zandfractie en 30 % voor de vulstoffractie)	10
Figuur 2.3	Voorbeeld van een korrelverdeling van een mengsel in volume en in massa	11
Figuur 2.4	Voorbeelden van een continue korrelverdeling (links) en een discontinue korrelverdeling, met discontinuïteit tussen 2 en 4 mm (rechts)	12
Figuur 4.1	Mengsels met verschillende volumieke massa's, doch gelijke mechanische kenmerken	22
Figuur 4.2	Mengsel van mineraal aggregaat en holle ruimte in het mineraal aggregaat	23
Figuur 4.3	Mengsel van mineraal aggregaat en holle ruimte na vulling door bindmiddel	24
Figuur 4.4	"Vulling" en "Vervanging" bij menging van verschillende korrelmaten	26
Figuur 4.5	Holle ruimte in een binair mengsel met 2 korrelgroottes D1 en D2, waarbij $D1/D2 \approx 0$	27
Figuur 4.6	Invloed van de hoekigheid op de holle ruimte	28
Figuur 4.7	Mengselvolumetrie en verband tussen VMA, volume bindmiddel en holle ruimte	29
Figuur 4.8	Lijnen van gelijke mastiekstijfheid (iso-MSI lijnen)	31
Figuur 5.1	Procedure mengselontwerp	34
Figuur 5.2	Korrelverdeling van de bestanddelen en het mengsel, getoetst aan de grenzen van het standaardbestek SB 250 v4.1a (Vlaamse Overheid, AWW, 2021) (grijze zone)	38
Figuur 5.3	Bepaling van het type mineraal skelet	39
Figuur 5.4	Correlatie tussen berekende en gemeten holle ruimte	46
Figuur 6.1	Afschuifmodulus (stijfheidsmodulus in afschuiving) van een bitumineus bindmiddel in functie van temperatuur en frequentie	50
Figuur 6.2	Impact van het bindmiddelgehalte op de mengselstijfheid, voor gelijke samenstelling van het mineraal aggregaat	51
Figuur 7.1	Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstelling in tabel 7.1 (1 ^{ste} ontwerp)	61
Figuur 7.2	Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstellingen in tabel 7.9 (mengsel zonder asfaltgranulaat)	67
Figuur 7.3	Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstellingen in tabel 7.9 (mengsel met asfaltgranulaat)	68
Figuur A1.1	Gyratoroestel en mal en proefstuk na verdichting	86
Figuur A1.2	Beweging van de mal tijdens de verdichting	87
Figuur A1.3	Waterconditionering en meting van de indirecte treksterkte van bitumineuze proefstukken	87
Figuur A1.4	Verkeerssimulator en meting van de spoordiepte	88
Figuur A1.5	Proefopstelling tweepuntsbuiging	89
Figuur A1.6	Principe van de tweepuntsbuigproef voor stijfheid	89
Figuur A1.7	Bepaling van de vermoeiingsweerstand aan de hand van de rek ϵ_6	90
Figuur A1.8	Rafelingsproef (Darmstadt Scuffing Device)	91
Figuur A2.1	Detail DSR apparatuur (parallel plate geometry)	92
Figuur A2.2	Illustratie van één kruip-herstelcyclus (1s kruip-9s herstel)	93
Figuur A2.3	BBR-apparatuur	94
Figuur A3.1	Verskil tussen schijnbaar en reëel volume van een aggregaat	96
Figuur A3.2	Residuale holten in met bitumen omhuld aggregaat	97
Figuur A3.3	Volumetrie van een mengsel met porositeit, versus equivalent mengsel zonder porositeit (alle volumes uitgedrukt in procent van het totale volume)	98

Lijst van de tabellen

Tabel 2.1	Samenstelling aggregaat en volumieke massa bestanddelen	10
Tabel 5.1	Verplichte materiaalkenmerken voor het theoretisch mengselontwerp	36
Tabel 5.2	Aggregaatsamenstelling voor het ontwerp van een mengseltype APO-A (volgens Vlaamse Overheid, AWW, 2021)	38
Tabel 5.3	Samenstelling van de vulstoffractie van het mengsel	40
Tabel 5.4	Samenstelling van het mengsel, in massa en in volumepercentages	42
Tabel 5.5	Samenstelling en empirische kenmerken van het mengbitumen	44
Tabel 6.1	Overzichtstabel van de invloeden van de mengselontwerpparameters en de volumetrie op de mengselprestaties	58
Tabel 7.1	Samenstelling aggregaat SMA 0/10 (1 ^{ste} ontwerp)	61
Tabel 7.2	Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie	62
Tabel 7.3	Experimentele verificatie van de holle ruimte	62
Tabel 7.4	Experimentele verificatie van de mengselprestaties	63
Tabel 7.5	Gewijzigde samenstelling van het aggregaat (3 ^{de} ontwerp)	64
Tabel 7.6	Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie	64
Tabel 7.7	Experimentele verificatie van de holle ruimte	65
Tabel 7.8	Experimentele verificatie van de mengselprestaties	65
Tabel 7.9	Samenstelling van het aggregaat voor een mengsel AVS 0/14, met en zonder asfaltgranulaat	67
Tabel 7.10	Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie	68
Tabel 7.11	Samenstelling en eigenschappen van het bindmiddel van het mengsel met asfaltgranulaat	69
Tabel 7.12	Experimentele verificatie van de holle ruimte	69
Tabel 7.13	Experimentele verificatie van de mengselprestaties	70
Tabel 8.1	Impact van bijsturing (optie 1) op bindmiddelgehalte en bindmiddelsamenstelling	74
Tabel 8.2	Impact van bijsturing (optie 1) op de empirische kenmerken van het bindmiddelmengsel	74
Tabel 8.3	Impact van bijsturing (optie 1) op volumetrie, vulstof en MSI	74
Tabel 8.4	Impact van de bijsturing (optie 2) op de samenstelling van het aggregaat in volumepercentages	75
Tabel 8.5	Impact van de bijsturing (optie 2) op de korrelverdeling	75
Tabel 8.6	Impact van bijsturing (optie 2) op bindmiddelgehalte en bindmiddelsamenstelling	76
Tabel 8.7	Impact van bijsturing (optie 2) op de empirische kenmerken van het bindmiddelmengsel	76
Tabel 8.8	Impact van bijsturing (optie 2) op volumetrie, vulstof en MSI	76
Tabel A3.1	Rekenvoorbeeld voor het geval van een mengsel type SMA, waarvan het aggregaat voor 68,8 v% uit poreus aggregaat bestaat	101



Woord vooraf

Deze handleiding beschrijft de door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw aanbevolen methode voor het ontwerp van bitumineuze mengsels, en vervangt de vorige handleiding A69/97. De handleiding sluit aan bij een reeks andere handleidingen van OCW:

- Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp en onderhoud van wegconstructies (A 102)
- Handleiding voor de bereiding van bitumineuze mengsels (A 72/02)
- Handleiding voor de verwerking van bitumineuze mengsels (A 96/18)
- Gebruikershandleiding PradoWeb ([PradoWeb manual](#))

Met deze handleiding wil OCW de kennis verspreiden om een juiste keuze te maken van de bestanddelen van bitumineuze mengsels en hun proportionele samenstelling, als functie van het type mengsel en de beoogde mengselprestaties. Samen met de productie en de verwerking van het bitumineuze mengsel is het mengselontwerp een cruciale fase in het tot stand komen van een duurzame asfaltverharding.

OCW beveelt een methode aan waarmee de ontwerper op een rationele en efficiënte wijze aan mengselontwerp kan doen. Het basisprincipe van de methode is dat het mengsel wordt samengesteld in volumedelen. Pas nadien wordt de samenstelling omgerekend naar massadelen, voor de afweging in het laboratorium en de productie. Deze handleiding biedt dan ook uitgebreid inzicht in de volumetrie van bitumineuze mengsels en de impact ervan op de prestaties.

De methode vertrekt van theoretische berekeningen, die steunen op experimentele bevindingen, en geïmplementeerd zijn in een gebruiksvriendelijke digitale applicatie, PradoWeb. Voor meer informatie over deze applicatie en de licentieaankoop wordt verwezen naar de website van OCW ([PradoWeb](#)).

In deze handleiding worden de berekeningen toegelicht, opdat de ontwerper de resultaten op een correcte wijze kan interpreteren, en vervolgens het ontwerp kan optimaliseren. Voorbeelden worden geïllustreerd aan de hand van PradoWeb. Dankzij deze eerste fase van theoretisch mengselontwerp wordt het aantal nodige laboratoriumproeven op het mengsel beperkt tot een minimum, wat een aanzienlijke besparing aan tijd en middelen betekent.

Mengselontwerp houdt in de praktijk meestal verband met de voorschriften van de verschillende gewestelijke standaardbestekken en de Europese normen. Er werd voor geopteerd om deze voorschriften niet over te nemen, maar te verwijzen naar de betreffende documenten waar nodig, zodat de handleiding actueel blijft bij toekomstige wijzigingen in bestekken en normen.

De methode is niet enkel aangewezen voor het ontwerp van nieuwe mengsels, ze is ook zeer goed inzetbaar om de impact te beoordelen van wijzigingen in zekere kenmerken van de bestanddelen of de samenstelling, wijzigingen die zich in de praktijk kunnen voordoen door variaties van materiaalkenmerken of schommelingen in de productie. Op die manier kan men eventuele risico's detecteren op gebied van bv. verwerkbaarheid of vervormbaarheid, en snel op gepaste wijze bijsturen.

De methode is ook toepasbaar in het kader van onderzoek en innovatie, los van bestekvoorschriften, of als functie van bijzondere of buitenlandse bestekken.



1. Inleiding

1.1 Bitumineuze mengsels en mengselontwerp

Een bitumineus mengsel is een mengsel van hoofdzakelijk mineraal aggregaat, omhuld door een bitumineus bindmiddel.

De bestanddelen spelen elk een specifieke rol: het aggregaat vormt als het ware een skelet, dat zorgt voor sterkte en stabiliteit, terwijl het bindmiddel het aggregaat omhult en bindt.

Om de bestanddelen te verwerken tot een homogeen mengsel, waarin de aggregaten volledig zijn omhuld, moet de viscositeit van het bitumineus bindmiddel worden verlaagd. In het geval van warm gemengd asfalt gebeurt dit door opwarming. Het mengsel wordt vervolgens warm getransporteerd naar de bouwplaats en gespreid en verdicht op de gewenste laagdikte, terwijl de viscositeit van het bitumen toeneemt naarmate het mengsel afkoelt.

Dit resulteert in een bitumineuze verharding, die de veiligheid en het comfort van de weggebruiker moet verzekeren en die weerstand moet bieden aan de belasting door het verkeer en de weersinvloeden waaraan de weg wordt blootgesteld.

Voor de bereiding en de verwerking van bitumineuze mengsels wordt verwezen naar de desbetreffende OCW-handleidingen:

- A 72/02 (Handleiding voor de bereiding van bitumineuze mengsels, 2002)
- A 96/18 (Handleiding voor de verwerking van bitumineuze mengsels, 2018)

Deze handleiding gaat specifiek over het ontwerp van bitumineuze mengsels.

Mengselontwerp is het proces dat moet leiden tot een **optimale keuze** van de **bestanddelen** en hun **proportionele samenstelling**, zodanig dat het mengsel voldoet aan de **gestelde prestatievereisten**.

Het belang van een goed mengselontwerp kan niet genoeg worden benadrukt. Net zoals de kwaliteit van de bereiding en de verwerking is het een noodzakelijke voorwaarde voor een duurzame asfaltverharding.

1.2 Prestatievereisten en prestatiekenmerken

Prestatievereisten zijn vereisten die worden gesteld aan prestatiekenmerken, dat wil zeggen kenmerken die typerend zijn voor de prestaties van het materiaal.

De belangrijkste prestatiekenmerken van een bitumineus mengsel, toegepast als component van de wegverharding, zijn:

- verwerkbaarheid en verdichtbaarheid, nodig voor de productie en uitvoering;
- mengselstijfheid, belangrijk voor de draagkracht van de wegstructuur waarvan de bitumineuze laag deel uitmaakt;
- weerstand tegen de belangrijkste vormen van schade onder invloed van verkeer en weersfactoren (temperatuur en neerslag):
 - spoorvorming;
 - vermoeiingsscheuren;
 - thermische scheuren;
 - rafeling.

Deze niet-exhaustieve opsomming is beperkt tot de prestatiekenmerken die het meest worden beïnvloed door keuzes gemaakt tijdens het mengselontwerp. Hoofdstuk 6 van deze handleiding gaat verder in op deze prestatiekenmerken en op de wijze waarop de verschillende mengselparameters deze prestatiekenmerken beïnvloeden.

Voor een meer volledige bespreking van alle prestatiekenmerken van asfaltmengsels, en het belang van elk prestatiekenmerk als functie van de mengselsoort, de positie van de laag in de opbouw van de verharding en de intensiteit van de verkeersbelasting, wordt verwezen naar hoofdstuk 3 van de OCW-handleiding A 102 (Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp of onderhoud van wegconstructies, 2020).

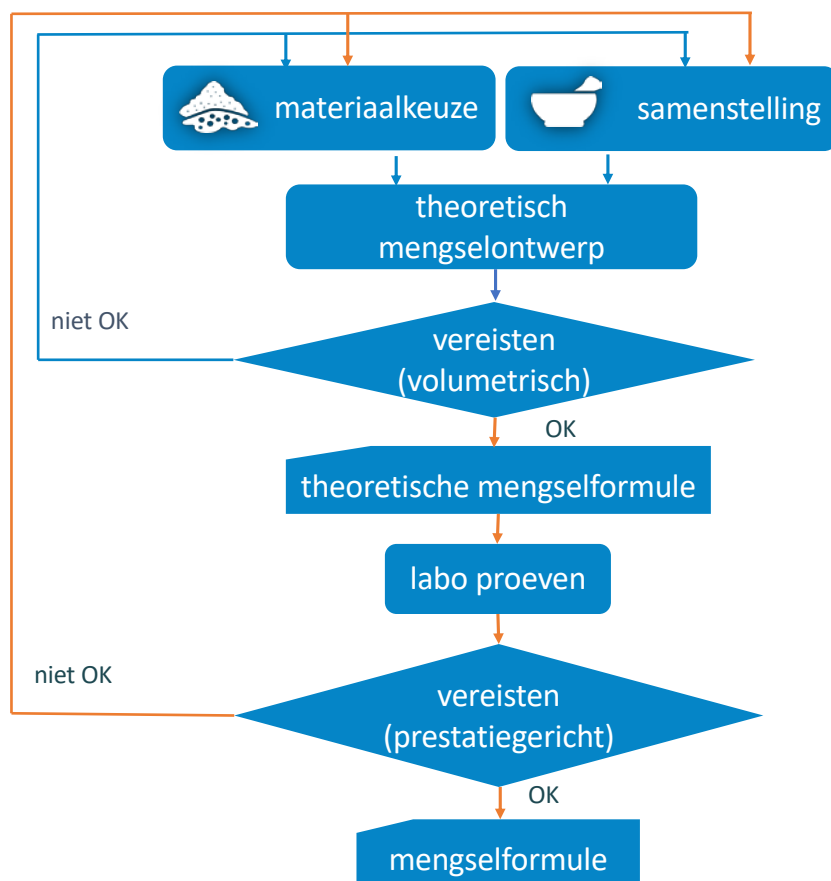
1.3 Het belang van mengselontwerp

Niemand ontkent het belang van mengselontwerp. Bij vele actoren in de sector is er echter nog nood aan meer kennis voor een juiste en systematische aanpak. Ontwerp van bitumineuze mengsels is namelijk geen eenvoudige opdracht, gezien de vele prestatiegerichte vereisten die niet altijd gemakkelijk verenigbaar zijn. Zo zal een hoger gehalte aan bindmiddel leiden tot een betere samenhang of cohesie van het mengsel, waardoor het mengsel minder gevoelig wordt aan rafeling, scheurvorming en de nadelige effecten van water. Stijfheid en weerstand tegen spoorvorming zullen daarentegen afnemen bij een hogere dosering van het bindmiddel. Zoals verder zal blijken, zijn het steeds vereisten in verband met cohesie (weerstand tegen rafeling en scheurvorming) die moeilijk te verenigen zijn met vereisten in verband met stabiliteit (stijfheid, weerstand tegen spoorvorming).

Het vinden van een evenwichtige mengselsamenstelling vereist daarom een goede methodiek, en de nood hieraan is de voorbije decennia alleen maar toegenomen, omwille van de volgende factoren:

- Het aanbod en gebruik van nieuwe en/of andersoortige bestanddelen blijft toenemen, net zoals de variabiliteit op de kenmerken van die bestanddelen. Asfaltgranulaat voor hergebruik in asfaltmengsels is daarvan het meest sprekende voorbeeld. Men kan dus steeds minder terugvallen op gekende en bewezen mengselformules en vaak moet het mengselontwerp worden herzien als functie van gewijzigde materialen en gewijzigde materiaalkenmerken.
- Het wegennet wordt blootgesteld aan steeds zwaardere belastingen. Niet enkel de belasting door het verkeer blijft toenemen, maar ook de weerscondities stellen de wegen zwaar op de proef. De klimaatverandering zal dit mogelijks nog versterken. Met het oog op duurzaamheid mag men geen genoegen nemen met een mengsel dat minimaal voldoet aan de gestelde prestatievereisten, maar moet men streven naar een mengselontwerp dat optimaal voldoet, rekening houdend met de economische en ecologische randvoorwaarden.

Om te verifiëren of een mengselformule beantwoordt aan de gestelde vereisten, moeten de prestatiekenmerken proefondervindelijk worden bepaald in het laboratorium. De prestatiegerichte proeven, kort beschreven in bijlage 1, vragen echter veel tijd en middelen. Het iteratief bijsturen van de mengselformule op basis van proefresultaten wil men dan ook zoveel mogelijk beperken. Een voorafgaandelijke fase van theoretisch mengselontwerp is daarom van essentieel belang en spaart tijd en middelen (figuur 1.1).



Figuur 1.1 – Theoretisch mengselontwerp als onderdeel van het ontwerpproces

Theoretisch mengselontwerp houdt in dat men aan de hand van berekeningen de prestaties inschat en de mengselformule (bestanddelen en hun proportionele samenstelling) optimaliseert. Dat maakt het mogelijk om snel de impact in te schatten van wijzigingen in bestanddelen en samenstelling, waardoor men de mengselformulering zeer gericht kan bijsturen. Het risico dat men de mengselformule nadien nog drastisch moet bijsturen op basis van resultaten van laboratoriumproeven neemt hierdoor sterk af. Dankzij theoretisch mengselontwerp komt men dus sneller en met minder middelen tot een meer optimaal resultaat.

Theoretisch mengselontwerp moet gebaseerd zijn op gekende en gevalideerde berekeningsmethodes en gepaard gaan met een goede berekeningstool om deze theoretische berekeningen snel en correct te kunnen uitvoeren. Om een dergelijke tool te bieden aan de asfaltsector werd de digitale tool PradoWeb ontwikkeld (<https://brrc.be/nl/innovatie/innovatie-overzicht/pradoweb>). Digitaal ontwerp is in vele sectoren een belangrijke en eerste fase bij productontwikkeling en innovatie. Dat geldt ook voor de asfaltsector.

1.4 Overzicht van deze handleiding

Bitumineuze mengsels worden vaak ingedeeld in categorieën. In een volgend hoofdstuk wordt de betekenis en het nut van deze indelingen nader toegelicht. Vervolgens geeft hoofdstuk 3 een overzicht van de verschillende bestanddelen van bitumineuze mengsels, met specifieke aandacht voor de kenmerken die men in acht moet nemen bij het theoretisch mengselontwerp. In hoofdstuk 4 wordt de methode voor theoretisch mengselontwerp uitgediept: welke grootheden worden berekend, op welke theoretische principes zijn de berekeningen gebaseerd, wat is het belang van de berekende grootheden en hoe kan men de samenstelling theoretisch optimaliseren op basis van de berekende grootheden? Hoofdstuk 5 beschrijft vervolgens de procedure voor mengselontwerp, zoals aanbevolen door OCW en geïmplementeerd in de PradoWeb-tool. Hoofdstuk 6 kijkt verder naar de prestatiekenmerken van het mengsel. Voor een goed mengselontwerp is het essentieel dat de ontwerper begrijpt op welke wijze de verschillende ontwerpparameters deze prestaties beïnvloeden, zodat hij het mengsel gericht kan bijsturen als functie van de beoogde prestaties. In hoofdstuk 7 volgen een aantal praktische voorbeelden, waaruit blijkt hoe men snel en met een minimum aan proeven tot een goed mengselontwerp komt. Hoofdstuk 8 ten slotte toont hoe de methodologie van theoretisch mengselontwerp kan worden ingezet in het kader van de dagelijkse werking van een asfaltcentrale, niet enkel voor het ontwerp van nieuwe mengsels, maar ook voor het bijsturen van de mengselsamenstelling tijdens de productie en het inschatten van de impact van bepaalde veranderingen in samenstelling en materiaalkenmerken. Het einddoel van deze handleiding is immers het aanreiken van de nodige kennis om deze impact te begrijpen en deze kennis te benutten ter verbetering van de kwaliteit en de duurzaamheid.

2. Indeling van bitumineuze mengsels

Een bitumineus mengsel is een mengsel van hoofdzakelijk mineraal aggregaat, omhuld door bitumineus bindmiddel.

Het aggregaat vormt het skelet van het mengsel, dit is de structuur die de lasten van het verkeer moet dragen en verdelen. De opbouw van dit skelet is dus veelzeggend voor de typische kenmerken van het mengsel. Bitumineuze mengsels worden daarom ingedeeld in drie grote families volgens het soort skelet: mengsels met steenskelet, zandskelet of vulstofskelet.

Wanneer men verder kijkt naar de korrelverdeling van het aggregaat, kan men een indeling maken tussen mengsels met een continue korrelverdeling en mengsels met een discontinue korrelverdeling.

Ten slotte maakt men ook een onderscheid tussen open en gesloten mengsels. Deze indeling zegt iets over de porositeit en hangt af van zowel de korrelverdeling als het bindmiddelgehalte.

Deze verschillende begrippen en hun betekenis worden hieronder nader toegelicht.

2.1 Steen-, zand- en vulstofskelet

Het geheel van korrelvormige aggregaten van een mengsel kan ruwweg worden beschouwd als een mengsel van drie componenten:

- stenen: alle korrels die op een zeef van 2 mm blijven liggen;
- zanden: alle korrels die door een zeef van 2 mm vallen en op een zeef van 0,063 mm blijven liggen;
- vulstof: alle korrels die door een zeef van 0,063 mm vallen.

Afhankelijk van de relatieve hoeveelheden van de drie componenten, bekomt men mengsels met verschillende typische kenmerken (figuur 2.1).



Figuur 2.1 – Illustratie van de families bitumineuze mengsels volgens soort skelet

2.1.1 Steenskelet

Wanneer de steenfractie overheerst (minstens 70 % van het volume van het aggregaat), is het skelet voornamelijk opgebouwd uit stenen die onderling in elkaar zijn verankerd (figuur 2.1, links). Deze stenen vormen een draagkrachtige en stabiele structuur, die de lasten van het verkeer goed verdraagt en verdeelt. Het volume aan zanden en vulstoffen moet relatief klein zijn, zodat deze korrels zich kunnen schikken in de holle ruimte tussen de stenen, zonder het steenskelet te verstoren. Uiteraard is de kwaliteit van de stenen, alsook de hoekigheid, van cruciaal belang voor steenskeletmengsels.

Omwille van de hoge stijfheid en stabiliteit bieden mengsels met een steenskelet een goede weerstand tegen spoorvorming en zijn ze uitermate geschikt voor wegen met zwaar verkeer.

2.1.2 Zandskelet

Wanneer de zandfractie hoog is in verhouding tot de steen- en vulstoffractie, drijven de zandkorrels de stenen uit elkaar en bepaalt hoofdzakelijk de zandfractie de stabiliteit van het skelet (figuur 2.1, midden). De stapeling en de vorm van de zandkorrels hebben dan ook een grote impact op de mengselprestaties.

In vergelijking met steenskeletmengsels vertonen zandskeletmengsels minder macrottextuur, waardoor ze beter bestand zijn tegen rafeling. Ze bieden ook het voordeel van gemakkelijker verwerkbaar te zijn, zeker wanneer de zandfractie naast brekerzand ook een deel rond zand bevat.

2.1.3 Vulstofskelet

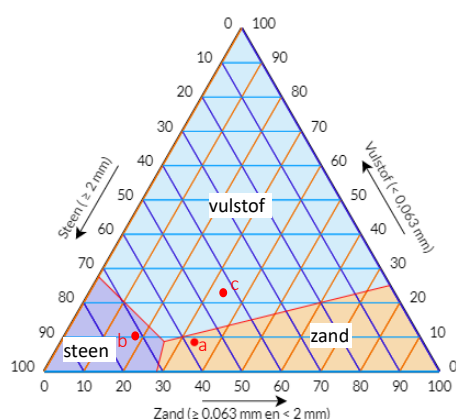
Wanneer de vulstoffractie hoog is in verhouding tot de holle ruimte tussen de steen- en zandkorrels, worden zowel de zand- als de steenkorrels uit elkaar gedreven en kan er zich geen stevig korrelskelet vormen (figuur 2.1, rechts). Het is dan de mastiek (het mengsel vulstof-bitumen) die moet instaan voor de draagkracht en weerstand tegen vervorming.

De weerstand tegen blijvende vervorming van een mengsel met vulstofskelet is uiteraard veel kleiner, omwille van het visco-elastisch karakter van de mastiek. Anderzijds hebben deze mengsels enkele bijzondere eigenschappen, zoals de goede verwerkbaarheid, de mogelijkheid tot plaatsing zonder verdichting en de waterondoorlatendheid.

2.1.4 Zeefdriehoek

Om bovenstaande families van bitumineuze mengsels en de grenzen tussen de families weer te geven, werd de zogenaamde zeefdriehoek geconstrueerd, zoals voorgesteld in figuur 2.2 (Heleven, 1985). Deze driehoek is een ternair diagram waarin men op de drie zijdes de coördinaten (% vulstof, % zand, % steen) uitzet. Elk mengsel stemt overeen met een punt in de driehoek en de ligging van dat punt ten opzichte van de grenslijnen toont tot welke familie het mengsel behoort.

Men merkt op dat de grenslijnen licht kunnen verschuiven, afhankelijk van de holle ruimtes van de individuele fracties. Bijvoorbeeld, voor een steenskeletmengsel: naarmate de holle ruimte van de steenfractie groter is, kunnen er meer zand- en vulstofkorrels worden toegevoegd, zonder verstoring van het steenskelet.



voorbeelden	% steen	% zand	% vulstof	
a	asfaltbeton	58	34	8
b	steenmastiekasfalt	71	19	10
c	gietasfalt	43	34	23

Figuur 2.2 – Indeling volgens mineraal skelet door middel van zeefdriehoek (grenslijnen getekend voor een gemiddelde holle ruimte van 40 % voor de steenfractie, 35 % voor de zandfractie en 30 % voor de vulstoffractie)

2.2 Continue en discontinue korrelverdeling

De korrelverdeling van het aggregaat wordt bepaald aan de hand van een reeks genormaliseerde draadzeven, gaande van 0,063 mm tot maximaal 32 mm maaswijdte. De korrelverdeling wordt weergegeven als doorval of als zeefrest (= 100 % - doorval), als functie van de zeefmaat, telkens uitgedrukt in percentage van het volledige aggregaat.

De percentages doorval of zeefrest kunnen op twee manieren worden uitgedrukt:

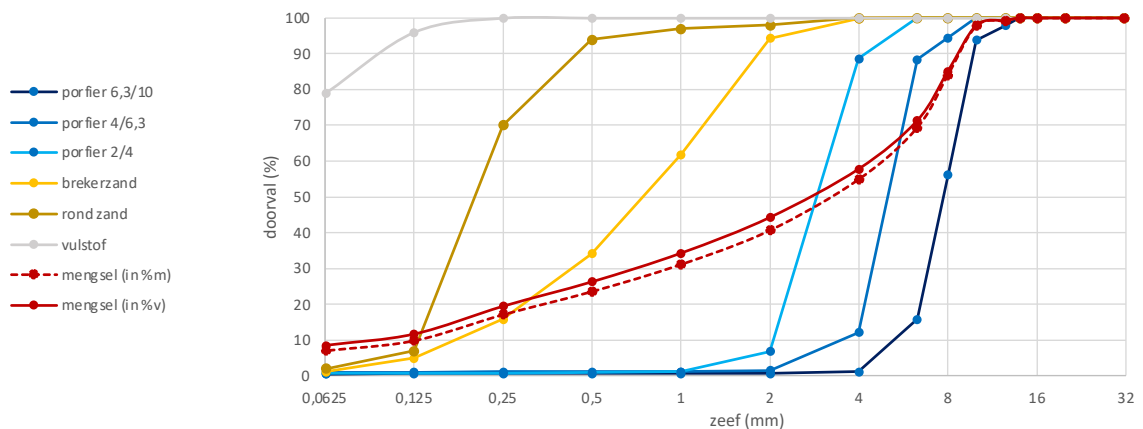
1. In massa, als percentage van de totale massa (%m)
2. In volume, als percentage van het totale volume (%v)

Wanneer alle korrels eenzelfde volumieke massa hebben, is er geen verschil tussen beide percentages. Doch, meestal is het droge aggregaat een samenstelling van verschillende materialen met verschillende volumieke massa's, waardoor dit onderscheid belangrijk is.

Figuur 2.3 toont een voorbeeld van een mengsel samengesteld uit zes bestanddelen, waarvan de volumieke massa's verschillen. De samenstelling van het mengsel en de volumieke massa's van de bestanddelen zijn weergegeven in tabel 2.1. De grafiek in figuur 2.3 illustreert het verschil tussen de korrelverdeling van het mengsel in volume en in massa.

naam	m%	volumieke massa (Mg/m ³)
porfier 6,3/10	35,0%	3,000
porfier 4/6,3	10,0%	3,000
porfier 2/4	14,0%	3,000
brekerzand	26,5%	2,650
rond zand	6,5%	2,650
vulstof	8,0%	2,300

Tabel 2.1 – Samenstelling aggregaat en volumieke massa bestanddelen



Figuur 2.3 – Voorbeeld van een korrelverdeling van een mengsel in volume en in massa

In de volgende hoofdstukken zal duidelijk worden waarom theoretisch mengselontwerp steeds moet gebeuren op basis van de korrelverdeling in volume.

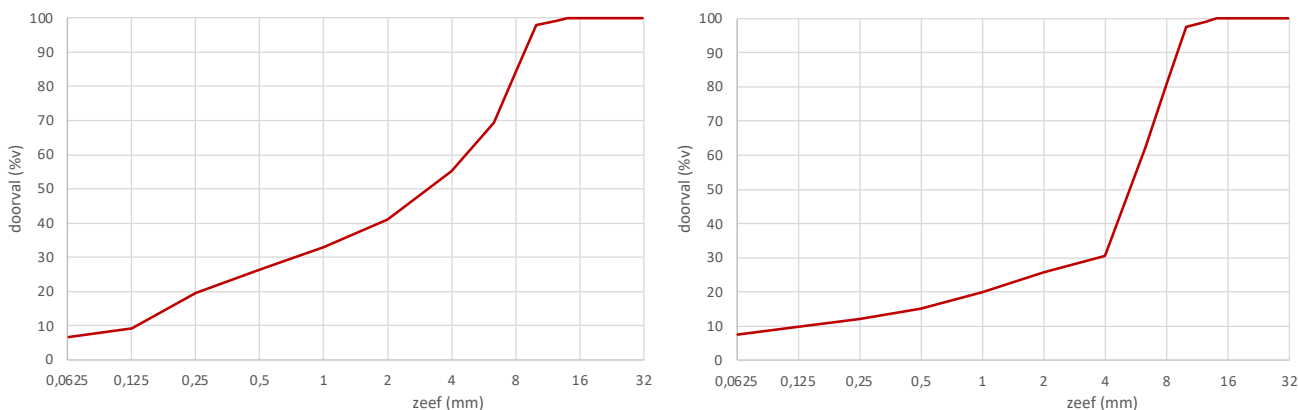
2.2.1 Continue korrelverdeling

Men spreekt van een continue korrelverdeling wanneer alle korrelmaten in voldoende mate vertegenwoordigd zijn. Kenmerkend voor een continue korrelverdeling is een korrelverdelingsdiagram waarvan de helling niet abrupt varieert, zoals in figuur 2.4, links. Een continue verdeling maakt een dichte stapeling van de korrels mogelijk, zodat de holle ruimte tussen de korrels relatief klein blijft. Mengsels met een continue korrelverdeling zijn dus doorgaans dichte en goed verwerkbare mengsels. Een typisch voorbeeld is asfaltbeton.

2.2.2 Discontinue korrelverdeling

Wanneer een bepaalde korrelfractie heel beperkt aanwezig is of ontbreekt, bijvoorbeeld de fractie met korrelmaat tussen 2 en 4 mm, spreekt men van een discontinue korrelverdeling. Dit is herkenbaar aan een quasi vlakke zone in het diagram, dat wil zeggen een discontinuïteit in de helling (figuur 2.4, rechts). In dit mengsel is er een duidelijk afgeleid onderscheid tussen enerzijds een grove fractie (met korrelmaat ≥ 4 mm) en anderzijds een fijne fractie (met korrelmaat < 2 mm). Wanneer de concentratie aan grove korrels voldoende hoog is resulteert dat in een stabiel skelet gevormd door de grove korrels, waartussen de fijnere korrels zich kunnen nestelen zonder het skelet te verstoren. Typische mengsels met een discontinue korrelverdeling zijn steenmastiekasfalt (SMA) en zeer open asfalt (ZOA).

Mengsels met een discontinue korrelverdeling vertonen dus doorgaans meer holle ruimte in het minerale skelet dan mengsels met een continue korrelverdeling. Hoe lager de concentratie van de fijne fractie, hoe minder de holten in de grove fractie worden gevuld en hoe hoger de holle ruimte in het mineraal skelet. Met een discontinue korrelverdeling kan men dus mengsels realiseren met zeer hoge holle ruimte. Een typisch voorbeeld hiervan is zeer open asfalt.



Figuur 2.4 – Voorbeelden van een continue korrelverdeling (links) en een discontinue korrelverdeling, met discontinuïteit tussen 2 en 4 mm (rechts)

2.3 Gesloten en open mengsels

2.3.1 Gesloten mengsels

Mengsels met een continue korrelverdeling hebben relatief weinig holle ruimte tussen de minerale korrels. Na toevoeging van het bindmiddel bevat het mengsel enkel nog interne holle ruimte en geen doorverbonden poriën. Men spreekt in dat geval van gesloten mengsels. Asphaltbeton is een voorbeeld van een gesloten mengsel.

Een mengsel met een discontinue korrelverdeling kan ook gesloten zijn, op voorwaarde dat het bindmiddelgehalte hoog genoeg is. Een voorbeeld daarvan is SMA.

2.3.2 Open mengsels

In geval van een discontinue korrelverdeling en een laag bindmiddelgehalte, blijven de holten in het mengsel doorverbonden, met andere woorden het mengsel is poreus. Zeer open asfalt is een duidelijk voorbeeld van een open mengsel.



3. Rol en kenmerken van de bestanddelen

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende bestanddelen en hun rol in het mengsel. De aandacht wordt gevestigd op de belangrijkste kenmerken waarmee rekening moet worden gehouden bij het theoretisch mengselontwerp, omwille van hun impact op het theoretisch mengselontwerp en de mengselprestaties die eerder werden opgesomd in § 1.2.

Dit betreft geen exhaustief overzicht van alle materiaalkenmerken, noch van de eisen gesteld aan de kenmerken. Voor de eisen aan de materiaalkenmerken wordt verwezen naar de gewestelijke standaardbestekken en de Europese normen ter zake.

Voor een aantal kenmerken wordt in hoofdstuk 6 nog dieper ingegaan op hun impact op de prestaties en het mengselontwerp.

De hieronder gehanteerde onderverdeling en terminologie is afgestemd op de toepassing van het materiaal als bestanddeel van een bitumineus mengsel en is in overeenstemming met de terminologie gebruikt in PradoWeb.

3.1 Steenslag

Onder steenslag wordt verstaan: aggregaat met korrelmaat d/D , waarbij d groter of gelijk is aan 2 mm. Het kan gaan om:

- steenslag van natuurlijke minerale oorsprong;
- steenslag van secundaire oorsprong afkomstig van een industrieel proces (bv. staalslakken).

Steenslag verleent door zijn intrinsieke mechanische eigenschappen sterkte en stijfheid aan het mengsel. De kenmerken die nodig zijn voor het theoretisch mengselontwerp worden hieronder opgesomd.

3.1.1 Hoekigheid

Om een stabiele korrelopbouw te bekomen is het gebruik van hoekige steenslag vereist. Hoekige korrels grijpen in op elkaar en blokkeren daardoor elkaars relatieve beweging, wat nodig is voor weerstand tegen blijvende vervorming. Voor steenslag afkomstig van gebroken aggregaat wordt aangenomen dat het voor 100 % hoekig is.

3.1.2 Korrelverdeling

De korrelverdeling moet zo nauwkeurig mogelijk gekend zijn. Een aggregaat met korrelmaat d/D heeft nog een percentage zeefrest op D en een doorval op d . In het bijzonder moet worden gelet op de doorval door de zeven van 2 mm en 0,063 mm. Deze waarden zijn beperkt door de bestekseisen, maar niettemin belangrijk, omwille van de bijdrage tot de zandfractie en de vulstoffractie van het volledige aggregaat.

3.1.3 Volumieke massa

Ruwweg wordt de volumieke massa van natuurlijk steenslag geschat op 2,6 tot 2,7 Mg/m³. Voor sommige aggregaten, en in het bijzonder in het geval van secundaire steenslag, kan de waarde echter afwijken.

De norm NBN EN 1097-6 (Bureau voor Normalisatie, 2013a) maakt een onderscheid tussen reële volumieke massa en schijnbare volumieke massa van een aggregaat. In praktijk is er enkel een verschil in het geval van poreuze aggregaten. Bijlage 3 gaat dieper in op de impact van poreuze aggregaten op het mengselontwerp.

Voor het mengselontwerp moet de reële volumieke massa zo accuraat mogelijk worden bepaald, om op een juiste manier de massapercentages in het mengsel om te rekenen naar volumepercentages (en omgekeerd).

3.1.4 Andere

Volgende intrinsieke materiaalkenmerken spelen een rol in de keuze van het steenslag, maar hebben verder geen impact op de bepaling van de proportionele samenstelling van het mengsel: verbrijzelingsweerstand (NBN, 2020a), slijtweerstand (NBN, 2011) en weerstand tegen polijsting (NBN, 2009a). Weerstand tegen polijsting is van bijzonder belang voor mengsels voor toplagen, omwille van het behoud van stroefheid, als essentiële vereiste voor de veiligheid. Deze kenmerken zullen bijgevolg aan bepaalde eisen moeten voldoen (Brussel Mobiliteit, 2016; Service Public de Wallonie, Mobilité & Infrastructures, 2021; Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer, 2021).

3.2 Zanden

Onder zand wordt verstaan: aggregaat met korrelmaat 0/D, waarbij $D \leq 2$ mm (in overeenstemming met norm NBN EN 13043). PradoWeb laat echter toe dat D groter is, zodat een granulaatmengsel (bijvoorbeeld 0/4 mm) kan worden ingevoerd als een “zand”.

De zanden dragen in hoofdzaak bij tot de zandfractie, die noodzakelijk aanwezig is om een gepaste korrelverdeling te realiseren en het mengsel verwerkbaar te maken. Doorgaans gebruikt men brekerzand, omwille van de hoekigheid. In sommige mengsels gebruikt men ook deels ronde zanden, specifiek om de verwerkbaarheid te verbeteren. Het gebruik van ronde zanden is echter niet aangewezen voor asfaltmengsels die een hoge weerstand moeten bieden aan blijvende vervorming.

De belangrijkste kenmerken die gekend moeten zijn voor het theoretisch mengselontwerp volgen in § 3.2.1 tot en met § 3.2.4.

3.2.1 Hoekigheid

De hoekigheid is belangrijk voor de weerstand tegen blijvende vervorming, om dezelfde reden als hiervoor beschreven voor het steenslag. Daarom wordt in mengsels voor zwaar belaste wegen, die een hoge weerstand tegen blijvende vervorming moeten bieden, uitsluitend brekerzand gebruikt. Wanneer weerstand tegen blijvende vervorming minder kritisch is, kan men deels ook ronde zanden toepassen om het mengsel beter verwerkbaar te maken.

Een mengsel van hoekige korrels bevat meer holle ruimte dan een mengsel van ronde korrels. De hoekigheid zal dus ook een invloed hebben op de holle ruimte in het volledige mineraal aggregaat waarvan het zand deel uitmaakt.

De hoekigheid is meetbaar aan de hand van de uitstroomcoëfficiënt (NBN, 2001), doch voor het theoretisch mengselontwerp met PradoWeb volstaat het om de hoekigheid te kenmerken als "1" (of 100 % hoekig) voor een brekerzand en "0" (of 100 % rond) voor een rond zand.

3.2.2 Volumieke massa

De volumieke massa van de zanden is een noodzakelijk gegeven om op een juiste manier de massapercentages in het mengsel om te rekenen naar volumepercentages (en omgekeerd). Voor het mengselontwerp moet de volumieke massa zo accuraat mogelijk worden bepaald.

3.2.3 Korrelverdeling

De korrelverdeling van de zanden draagt bij tot de volledige korrelverdeling van het aggregaat. Er dient vooral gelet te worden op de doorval door de zeef van 0,063 mm, die in België beperkt wordt door de bestekseisen. Wanneer het zand een hoog gehalte aan fijne deeltjes bevat, zullen deze een belangrijke bijdrage leveren aan de vulstoffractie van het volledige mengsel van mineraal aggregaat.

3.2.4 Andere

In het geval van mengsels met een hoog gehalte aan zanden, heeft ook de polijstingsweerstand van het zand een impact op het behoud van de stroefheid. Men kiest dan voor een brekerzand afkomstig van een moedergesteente met voldoende hoge polijstingsweerstand.

3.3 Vulstoffen

Onder vulstof wordt verstaan: aggregaat waarvan het grootste deel door de zeef van 0,063 mm valt. Men onderscheidt hierbij:

- aanvoervulstof: een vulstof afzonderlijk geproduceerd en aangevoerd als bestanddeel van het mengsel;
- teruggewonnen vulstof: eigen stof van zanden en steenslag dat via de ontstoffingsinstallatie wordt teruggewonnen.

De vulstof zal zich mengen met het bindmiddel om de mastiek te vormen, zodat de mastiek beschouwd moet worden als de eigenlijke fase die de zanden en steenslag omhult en verbindt. De rol van de vulstof bestaat er dus hoofdzakelijk in om de mastiek een gepaste consistentie en cohesie te verlenen. Op het belang van de consistentie van de mastiek wordt dieper ingegaan in § 4.4.

Noot: Wanneer men pigment toevoegt om het mengsel te kleuren, zal het fijne pigment de consistentie van de mastiek beïnvloeden op dezelfde manier als een vulstof. Vanuit het perspectief van theoretisch mengselontwerp zal pigment dus ook worden beschouwd als een vulstof.

De belangrijkste kenmerken die gekend moeten zijn voor het theoretisch mengselontwerp zijn:

3.3.1 Volumieke massa

De volumieke massa van de vulstoffen is een noodzakelijk gegeven om op een juiste manier de massapercentages in het mengsel om te rekenen naar volumepercentages (en omgekeerd). Voor het mengselontwerp moet de volumieke massa zo accuraat mogelijk worden bepaald.

3.3.2 Korrelverdeling

De korrelverdeling, in het bijzonder de doorval door de zeef van 0,063 mm, is van groot belang gezien deze doorval in hoge mate bijdraagt tot de werkelijke vulstof van het mengsel.

3.3.3 Holle ruimte volgens Rigden

De holle ruimte in de droge vulstof, verdicht door middel van een Rigden apparaat volgens een gestandaardiseerde methode (NBN, 2008), houdt verband met het verstijvend vermogen van de vulstof, wanneer gemengd met bindmiddel. Een vulstof met een hogere Rigden holle ruimte zal aanleiding geven tot een stijvere mastiek. Hier wordt verder op ingegaan in § 4.4.

3.4 Bindmiddelen

Het bindmiddel is het bestanddeel dat het mineraal aggregaat bindt. Bij hoge temperatuur moet de consistentie voldoende laag zijn opdat het bitumineuze mengsel mengbaar en verwerkbaar zou zijn, terwijl bij de gebruikstemperaturen het bindmiddel voldoende consistent moet zijn om draagkracht, cohesie en weerstand tegen blijvende vervorming te verzekeren.

Het meest voorkomend is wegenbitumen, een bitumen verkregen door destillatie van ruwe aardolie, dat voldoet aan de productnorm NBN EN 12591 (NBN, 2009b) en de eisen in de gewestelijke standaardbestekken. Wegenbitumina worden onderverdeeld in zogenaamde pen-classes, volgens hun naaldpenetratie bij 25 °C, gemeten volgens de norm NBN EN 1426 (NBN, 2015).

Daarnaast zijn er nog bijzondere soorten bindmiddelen, onder andere:

- polymeergemodificeerd bitumen (PmB): gemodificeerd met polymeren om de reologische kenmerken te verbeteren (voldoet aan de productnorm NBN EN 14023 [NBN, 2010]);
- hard bitumen: behandeld om een zeer hoge stijfheid te bekomen (voldoet aan de productnorm NBN EN 13924-1 [NBN, 2015b]);
- synthetisch pigmenteerbaar bindmiddel (al dan niet polymeergemodificeerd): doorschijnend en desgewenst te kleuren met pigment.

De belangrijkste kenmerken die gekend moeten zijn voor het theoretisch mengselontwerp zijn:

3.4.1 Reologische kenmerken

Het bindmiddel is een visco-elastisch materiaal. Bij lage temperatuur en hoge belastingsfrequentie zijn de stijfheid en viscositeit hoog, zodat de vervormingen klein blijven. Bij hoge temperatuur en lage belastingsfrequentie nemen stijfheid en viscositeit af, zodat het bitumen gaat vloeien.

Voor wegenbitumen wordt de consistentie gekenmerkt door de volgende empirische kenmerken:

- indringing of naaldpenetratie bij 25 °C (pen, in 10-1 mm), volgens NBN EN 1426 (NBN, 2015);
- verwekingspunt Ring en Kogel ($T_{R\&K}$, in °C), volgens NBN EN 1427 (NBN, 2015b).

De indringing is een maat voor de hardheid: hoe lager de pen-waarde, hoe harder het bindmiddel. Het verwekingspunt is kenmerkend voor de weerstand tegen blijvende vervorming: hoe hoger het verwekingspunt, hoe minder gevoelig het bindmiddel zal zijn voor blijvende vervorming bij hogere gebruikstemperaturen.

Voor de overige bindmiddelen, zoals voor polymeergemodificeerde bindmiddelen, geven indringing en verwekingstemperatuur geen goed beeld van het reologisch gedrag. Voor deze bindmiddelen zal men andere meetmethodes, gebruik makend van DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) of BBR (*Bending Beam Rheometer*), inzetten om een meer volledig beeld te vormen van het reologisch gedrag. Voor de praktijk beperkt men zich doorgaans tot de bepaling van de complexe afschuifmodulus G^* via DSR, bij welbepaalde temperaturen en frequenties die relevant zijn voor de mengselprestaties. Deze complexe moduluswaarden kunnen ook worden ingevoerd in PradoWeb en worden daar verder gebruikt om de stijfheid van het asfaltmengsel te voorspellen (§ 5.3.4).

Voor de productie en verwerking van het asfaltmengsel is de viscositeit van het bindmiddel bij hoge temperatuur van belang. Voor het mengen beoogt men gewoonlijk een dynamische viscositeit van 0,28 Pa.s, en voor het verdichten een dynamische viscositeit van 0,37 Pa.s (West et al., 2010). Voor wegenbitumen geeft de norm NBN EN 12697-35 (NBN, 2016b) voor het mengen en verdichten in het laboratorium de temperaturen aan waarbij deze viscositeitswaarden worden bereikt. Voor synthetische bindmiddelen en polymeergemodificeerde bindmiddelen zijn deze equiviscositeitstemperaturen echter niet van toepassing. De optimale meng- en verwerkingstemperaturen moeten dan worden bepaald aan de hand van viscositeitsmetingen in het gebied van de hoge verwerkingstemperaturen.

Voor meer bijzonderheden over de reologische proeven voor bitumineuze bindmiddelen wordt verwezen naar bijlage 2.

3.4.2 Volumieke massa

De volumieke massa van het bindmiddel is een noodzakelijk gegeven om op een juiste manier de massapercentages in het mengsel om te rekenen naar volumepercentages (en omgekeerd).

3.5 Asfaltgranulaat

Asfaltgranulaat is een secundair materiaal, afkomstig van afgefreesde of opgebroken asfaltverhardingen, dat voldoet aan de norm NBN EN 13108-8 (NBN, 2016-2019). Hergebruikt als bestanddeel van een nieuw bitumineus mengsel, zal de droge aggregaatfractie bijdragen tot het aggregaat, en de bindmiddelfractie tot het bindmiddel. Gezien het bindmiddel uit asfaltgranulaat werd blootgesteld aan langetermijnveroudering, wordt het verder kortweg "oud bindmiddel" genoemd. Wanneer het asfaltgranulaat warm wordt toegevoegd, zal men, voor de eenvoud van de berekening, voor het theoretisch mengselontwerp ervan uitgaan dat het oud bindmiddel zich volledig mengt met het nieuw bitumen.

De belangrijkste kenmerken die gekend moeten zijn voor het theoretisch mengselontwerp volgen in § 3.5.1 tot en met § 3.5.8.

3.5.1 Bindmiddelgehalte

Het oud bindmiddel zal samen met het nieuw toegevoegde bindmiddel opnieuw de rol van bindmiddel opnemen. Het gehalte aan oud bindmiddel in het asfaltgranulaat is dus een noodzakelijk gegeven.

3.5.2 Kenmerken oud bindmiddel

Veroudering resulteert in een verlaging van de naaldpenetratie en een verhoging van het verwekingspunt. Kennis van deze empirische kenmerken laat toe om, aan de hand van eenvoudige mengwetten, de naaldpenetratie en het verwekingspunt te voorspellen van het mengbitumen dat zal resulteren uit de menging van nieuw en oud bitumen.

$$\log \text{pen}_{\text{meng}} = (1-a) \cdot \log \text{pen}_{\text{nieuw}} + a \cdot \log \text{pen}_{\text{oud}} \quad (3.1)$$

$$T_{\text{R\&K meng}} = (1-a) \cdot T_{\text{R\&K nieuw}} + a \cdot T_{\text{R\&K oud}} \quad (3.2)$$

waarbij:

pen_{meng} : penetratie van het mengbitumen

$T_{\text{R\&K meng}}$: verwekingspunt van het mengbitumen

a : massaconcentratie van het oud bindmiddel in het mengbitumen (= massa oud bitumen / massa mengbitumen)

Deze mengwetten zijn strikt genomen enkel geldig indien zowel oud als nieuw bindmiddel wegenbitumina zijn. In alle andere gevallen zijn deze mengwetten weinig betrouwbaar. Men kan ze eventueel wel gebruiken om in het geval van een PmB een voorspelling te maken van de pen-klasse.

3.5.3 Volumieke massa oud bindmiddel

De volumieke massa van oud bindmiddel bedraagt conventioneel $1,030 \text{ Mg/m}^3$. De exacte volumieke massa van het oud bindmiddel is een noodzakelijk gegeven om de volumieke massa van het mengbitumen te bepalen en om massapercentages in het mengsel om te rekenen naar volumepercentages (en omgekeerd).

3.5.4 Volumieke massa droge aggregaatfractie

In tegenstelling tot steenslag en zanden afkomstig van één enkel moedergesteente, is de droge fractie van asfaltgranulaat een mengsel van korrels van verschillende oorsprong. De volumieke massa verschilt dus van korrel tot korrel. Dit betekent dat de volumieke massa die men meet op de droge aggregaatfractie eigenlijk een gewogen gemiddelde is van de volumieke massa's van de individuele korrels.

In praktijk volstaat het om, in geval van asfaltgranulaat, de volumieke massa te meten op de afzonderlijke steen-, zand- en vulstoffractie, om de werkelijke variatie in volumieke massa volgens korrelmaat voldoende te benaderen.

De gemiddelde volumieke massa van de droge aggregaatfractie kan dan worden berekend als:

$$\rho_{\text{droog}} = 100 / (m\%_{\text{steen}} / \rho_{\text{steen}} + m\%_{\text{zand}} / \rho_{\text{zand}} + m\%_{\text{vulstof}} / \rho_{\text{vulstof}}) \quad (3.3)$$

waarbij

$m\%_{\text{steen, -zand, -vulstof}}$: massa's steen-, zand- en vulstoffractie, in percentage van de totale massa van de droge aggregaatfractie ($m\%_{\text{steen}} + m\%_{\text{zand}} + m\%_{\text{vulstof}} = 100$)

$\rho_{\text{steen, -zand, -vulstof}}$: volumieke massa's steen-, zand- en vulstoffractie

3.5.5 Volumieke massa asfaltgranulaat

De volumieke massa van het asfaltgranulaat, bestaande uit de droge aggregaatfractie en het oud bindmiddel, kan men rechtstreeks meten op het asfaltgranulaat, of berekenen op basis van bovenstaande volumieke massa's, en het bindmiddelgehalte van het asfaltgranulaat:

$$\rho_{\text{AG}} = 100 / (m\%_{\text{bindmiddel}} / \rho_{\text{bindmiddel}} + (100 - m\%_{\text{bindmiddel}}) / \rho_{\text{droog}}) \quad (3.4)$$

waarbij

ρ_{AG} : volumieke massa asfaltgranulaat

$m\%_{\text{bindmiddel}}$: bindmiddelgehalte van het asfaltgranulaat

$\rho_{\text{bindmiddel}}$: volumieke massa bindmiddel

ρ_{droog} : volumieke massa droge aggregaatfractie

3.5.6 Korrelverdeling droge aggregaatfractie

De droge aggregaatfractie draagt bij tot zowel de steen-, zand- als de vulstoffractie van het mengsel. Accurate kennis van de korrelverdeling van de aggregaatfractie van het asfaltgranulaat, gemeten op het gewassen en gedroogde aggregaat, is dus noodzakelijk. Deze korrelverdeling wordt in het vakjargon de "witte korrelverdeling" genoemd, om het onderscheid te maken met de "zwarte korrelverdeling", die gemeten wordt op het met bindmiddel omhulde asfaltgranulaat.

Gezien het aggregaat afkomstig van asfaltgranulaat doorgaans een mengsel is van aggregaten van verschillende aard, is er een verschil naargelang de korrelverdeling is uitgedrukt in massapercentage of in volumepercentage, zoals eerder beschreven in § 2.2. In praktijk bepaalt men de korrelverdeling door weging, dat wil zeggen in massapercentage. Deze korrelverdeling kan worden omgerekend naar een korrelverdeling in volumepercentage, mits kennis van de volumieke massa als functie van de korrelmaat.

3.5.7 Hoekigheid droge aggregaatfractie

Ook al zijn de aggregaten in het asfaltgranulaat van oorsprong gebroken, dat wil zeggen hoekig, is het mogelijk dat de hoekigheid afneemt door het gebruik (slijtage en polijsting aan het wegoppervlak) en door de verschillende behandelingen die de aggregaten hebben ondergaan tijdens de recyclage (frezen, verbrokkelen, zeven, enz.). Het is belangrijk dat men zich hiervan bewust is, omwille van de impact van de hoekigheid op de mengselprestaties (hoofdstuk 6).

3.5.8 Holle ruimte vulstoffractie

De vulstoffractie van het asfaltgranulaat zal bijdragen tot de vulstoffractie van het nieuwe mengsel waarin het asfaltgranulaat wordt hergebruikt. De holle ruimte volgens Rigden van de vulstoffractie heeft dus ook een invloed op de holle ruimte van de volledige vulstoffractie. Het belang van deze holle ruimte wordt verder toegelicht in § 4.4.

3.6 Additieven

Onder additieven wordt verstaan: bestanddelen die in zeer kleine mate worden toegevoegd aan het mengsel tijdens de menging. Tal van additieven vinden vandaag hun toepassing in bitumineuze mengsels, voor zeer uiteenlopende doeleinden, onder andere:

- verlaging van de productietemperatuur;
- verjonging van het oud bitumen;
- remming van mengselsegregatie (afdruipremmers);
- verbetering van de kenmerken van het bitumen;
- verbetering van de hechting tussen bindmiddel en aggregaat.

Elk additief dat wordt toegevoegd als afzonderlijk bestanddeel zal, ook al wordt het toegevoegd in zeer kleine mate, een invloed hebben op de volumetrie van het mengsel. De volumieke massa van elk additief moet dus gekend zijn om op een juiste manier de volumieke massa van het mengsel te berekenen.

De invloed van de additieven op de bindmideleigenschappen en de mengselprestaties hangt af van onder meer het type additief, de dosering en de wijze van toevoeging, en is dus zeer specifiek.

4. Theoretisch mengselontwerp

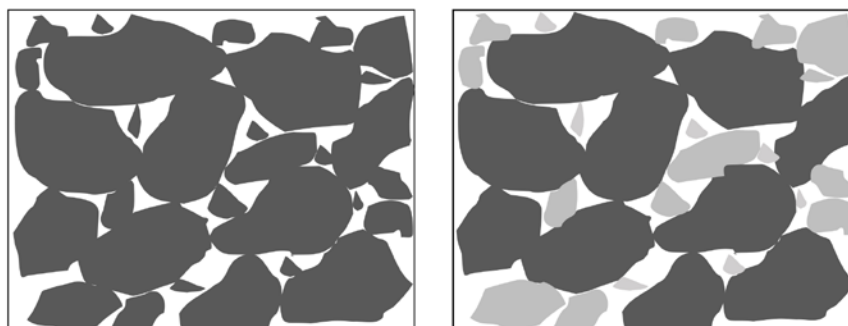
De theoretische ontwerpmethode van OCW streeft ernaar om de volumetrie van het mengsel te optimaliseren met het oog op de gewenste prestaties. De methode vertrekt van de samenstelling van het mineraal aggregaat. Deze samenstelling bepaalt de opbouw van het mineraal skelet. Een bijzondere rekenmethode wordt toegepast voor de berekening van de holle ruimte in het mineraal aggregaat. Daarna wordt het volume aan bindmiddel bepaald, rekening houdend met de beschikbare holle ruimte en met de samenstelling van de mastiek (het mengsel van bindmiddel en vulstoffractie).

De basisprincipes van deze theoretische berekeningsmethode worden in dit hoofdstuk nader toegelicht. Tot slot wordt aangegeven hoe men de mengselsamenstelling kan bijsturen om de volumetrie te optimaliseren.

4.1 Formulering in volumedelen

4.1.1 Fysische grondslag

De volumes die ingenomen worden door de verschillende korrels zijn bepalend voor de structuur van het mineraal skelet, en die structuur heeft een grote impact op de prestatiekenmerken van het bitumineuze mengsel. Stel dat men in het korrelvormige mengsel in figuur 4.1, links, de fijnere korrels vervangt door een gelijkvormig granulaat met identieke mechanische eigenschappen, doch een andere volumieke massa. Volumetrisch verandert er niets en de mechanische kenmerken (stijfheid en sterkte) blijven dezelfde, en dus zal er ook niets veranderen aan het mechanisch gedrag. De inwerkende krachten worden immers op identieke wijze verdeeld over de verschillende korrels, ongeacht hun massa. Nochtans zal de korrelverdeling, in massapercentages uitgedrukt, verschillend zijn voor beide mengsels. Het is dus niet zinvol om de samenstelling van het mineraal aggregaat uit te drukken in massapercentages, zonder rekening te houden met de volumieke massa's van de verschillende korrels. Afhankelijk van de volumieke massa's van de korrels zou dat leiden tot verschillen in volumetrie, en dus tot verschillende mechanische kenmerken.



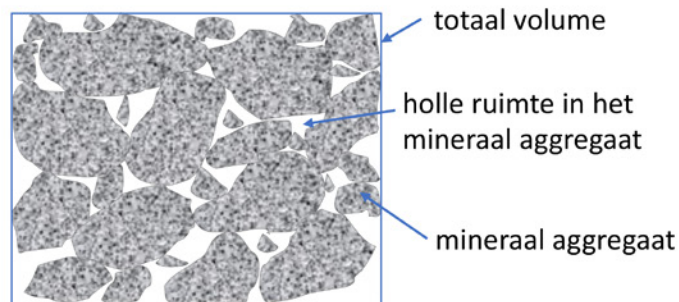
Figuur 4.1 – Mengsels met verschillende volumieke massa's, doch gelijke mechanische kenmerken

4.1.2 Volumetrische grootheden

Holle ruimte in het mineraal aggregaat (VMA)

Wanneer men verschillende korrelvormige aggregaten mengt, zullen ze een groter volume innemen dan hun werkelijke volume, omdat er holle ruimte blijft tussen de korrels (figuur 4.2).

Deze holle ruimte wordt weergegeven door de afkorting VMA, voor *Voids in the Mineral Aggregate*, en uitgedrukt in percentage van het totaal volume.



Totaal volume = volume aggregaat + holle ruimte in het mineraal aggregaat

Figuur 4.2 – Mengsel van mineraal aggregaat en holle ruimte in het mineraal aggregaat

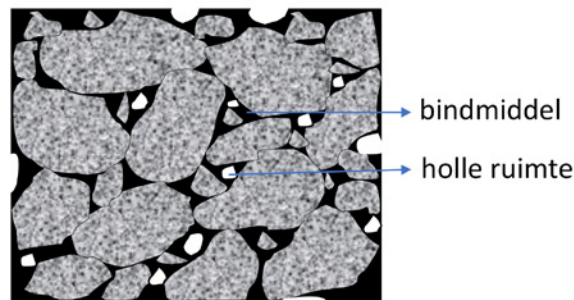
De VMA speelt een sleutelrol in het mengselontwerp, omdat deze bepalend is voor het volume bindmiddel dat het mengsel kan bevatten en de residuele holle ruimte van het bitumineuze mengsel. In § 4.2 gaan we in op de theoretische berekening van de VMA.

Volume bindmiddel

Het volume bindmiddel heeft een zeer grote impact op de mengselprestaties:

- Het volume moet voldoende groot zijn voor een uniforme omhulling van de minerale korrels en voor voldoende hechtbruggen om de cohesie te garanderen. Een hoog bindmiddelvolumen verhindert bovendien dat water diep doordringt tot in de bulk van het mengsel. Het zorgt bovendien voor de verwerkbaarheid van het mengsel.
- Het volume bindmiddel mag anderzijds nooit groter zijn dan het volume van de beschikbare ruimte tussen de korrels van het skelet. Een overmaat aan bindmiddel zal leiden tot ontwrichting van het skelet, met nefaste gevolgen voor de stabiliteit en weerstand tegen vervorming (spoorvorming) en overtollig bindmiddel dat naar het oppervlak wordt geperst (zweeten).

Het mengsel zal dus steeds worden ontworpen met een gepaste residuele holle ruimte na vulling door bindmiddel (figuur 4.3). Het volume bindmiddel, uitgedrukt in percentage van het totaal volume, zal dus kleiner zijn dan de VMA.



Figuur 4.3 – Mengsel van mineraal aggregaat en holle ruimte na vulling door bindmiddel

Noot: Als het aggregaatmengsel poreuze aggregaten bevat, zullen deze een bepaald volume aan bindmiddel absorberen. Het bindmiddel geabsorbeerd in de poriën draagt niet effectief bij tot de omhulling van de aggregaten, maar het moet wel worden meegerekend voor de dosering van het bindmiddel. Bijlage 3 beschrijft de impact van poreuze aggregaten op het mengselontwerp.

Holle ruimte

Zoals blijkt uit figuur 4.3, wordt de residuale holle ruimte, of kortweg de holle ruimte, bepaald door twee volumetrische grootheden: VMA en volume bindmiddel. Wanneer we het volume bindmiddel ook uitdrukken als percentage van het totaal volume, geldt het verband:

$$\text{Holle ruimte} = \text{VMA} - \text{Volume bindmiddel (in \%)}$$

Gezien de relatie tussen VMA, volume bindmiddel en holle ruimte, zal voor eenzelfde VMA een toename/afname van het volume bindmiddel leiden tot een afname/toename van de holle ruimte. Wanneer men bijgevolg het bindmiddelgehalte wil verlagen zonder dat de holle ruimte toeneemt, moet men ervoor zorgen dat de VMA afneemt.

De holle ruimte heeft een zeer grote impact op alle mengselprestaties.

Enkele voorbeelden:

- Een hoge holle ruimte betekent doorgaans minder cohesie, een hogere scheurgevoeligheid en een hogere doorlatendheid van water, die de cohesie bovendien sneller aantast. Voor sommige toepassingen en types (bv. zeer open asfalt) wordt echter bewust gestreefd naar een hoge holle ruimte, omwille van de akoestische eigenschappen en de gewenste waterafvoer. De levensduur van deze mengsels is dan ook geringer.
- Er zal altijd een minimale holle ruimte aanwezig moeten zijn, zodat er ruimte blijft voor het opvangen van effecten zoals verdere verdichting van het mengsel door het verkeer en thermische uitzetting van het bindmiddel. Een te lage holle ruimte kan leiden tot problemen zoals instabiliteit (spoorvorming) en opstijgend bindmiddel (zweeten).

Dit wordt verder behandeld in hoofdstuk 6.

Holle ruimte gevuld door bindmiddel (VFB)

Een vaak gebruikt begrip in deze context is de holle ruimte gevuld door bindmiddel, weergegeven door VFB, voor *Void Filled with Binder*. De VFB, die wordt uitgedrukt als percentage van de VMA ingenomen door bindmiddel, is dus een maat voor de vullingsgraad door bindmiddel.

$$VFB = 100 \% * \text{Volume bindmiddel} / \text{VMA (in \%)}$$

Een VFB-waarde van 100 % betekent dat de holle ruimte in het mineraal aggregaat volledig gevuld is door bindmiddel en is dus de grens voor overvulling.

Men onthoudt hieruit het belang van de **volumes** die worden ingenomen door de verschillende bestanddelen en het belang van de holle ruimte voor de mengselprestaties. Het mengselontwerp moet dus streven naar een optimale samenstelling in volumedelen. Vervolgens kan men de samenstelling omrekenen naar een samenstelling in massadelen, rekening houdend met de volumieke massa's van de verschillende bestanddelen.

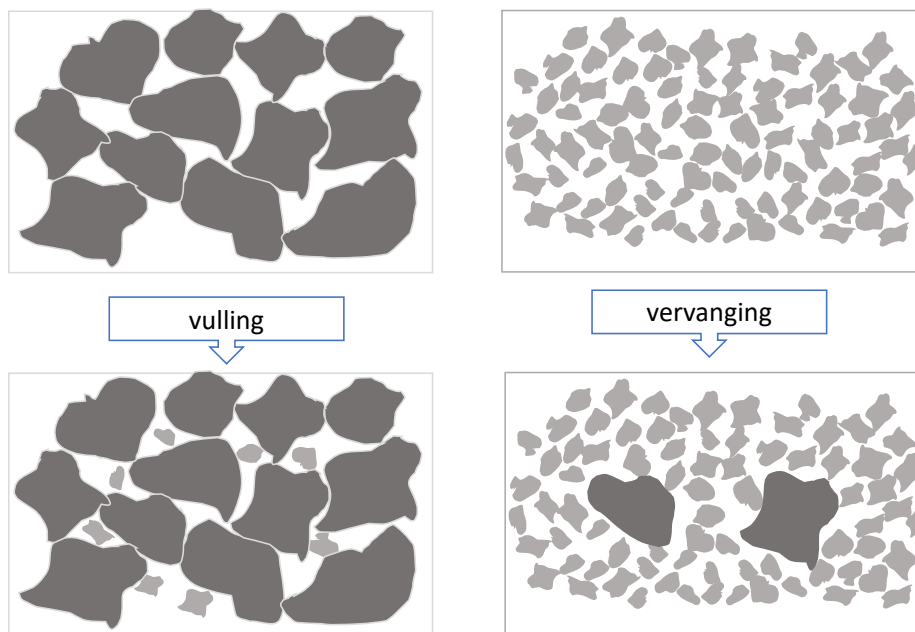
De volumieke massa's van de bestanddelen zijn dus uiterst belangrijke gegevens voor het mengselontwerp. De juiste kennis ervan is onmisbaar voor de omzetting van massa naar volume en omgekeerd.

4.2 Berekening van de holle ruimte in het mineraal aggregaat

De berekening van de VMA is gebaseerd op de modellering van de wijze waarop de korrels van een mengsel van minerale aggregaten zich schikken, afhankelijk van hun grootte en hun concentratie in het mengsel:

- Kleine korrels in lage concentratie kunnen zich schikken tussen grotere korrels, zonder de schikking van de grote korrels te verstoren. Ze vullen dus de holle ruimte tussen de grotere korrels. Deze schikkingswijze wordt logischerwijze "vulling" genoemd (figuur 4.4, links).
- Grote korrels daarentegen kan men niet inbrengen in een mengsel van kleine korrels zonder kleine korrels te verplaatsen. De grote korrels zullen dan de plaats innemen van kleinere korrels. Deze schikkingswijze wordt "vervanging" genoemd (figuur 4.4, rechts).

Men merkt op dat in beide gevallen de holle ruimte van het mengsel afneemt, in vergelijking met de holle ruimte van de grove fractie en de fijne fractie op zich.



Figuur 4.4 - "Vulling" en "Vervanging" bij menging van verschillende korrelmaten

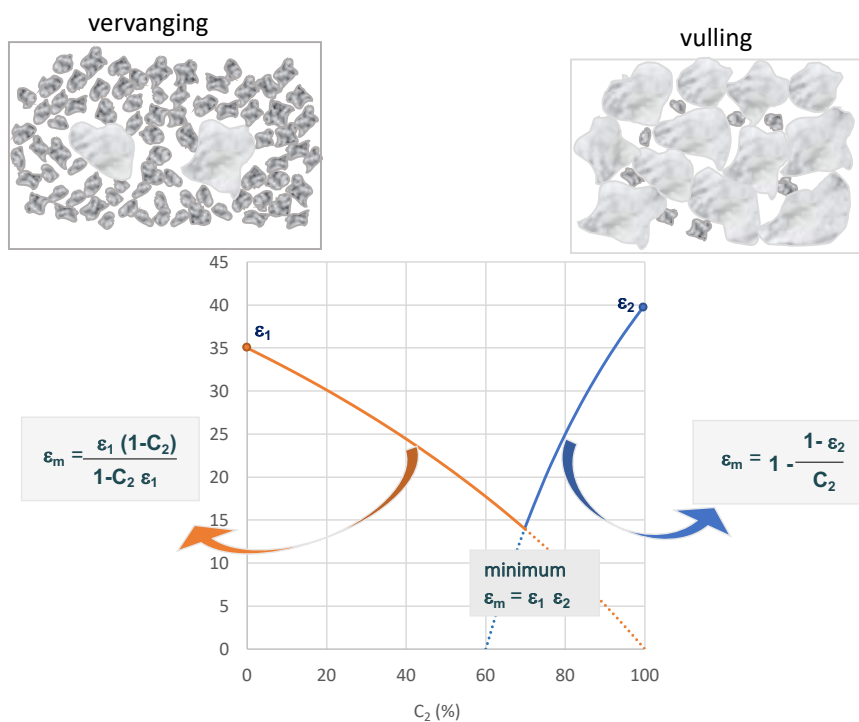
4.2.1 Mengsel van fijne en grove fractie

In het geval van een binair mengsel, dat wil zeggen een mengsel met slechts twee verschillende korrelgroottes D_1 en D_2 , waarbij korrelgrootte D_1 verwaarloosbaar klein is ten opzichte van D_2 , zijn de schikkingswijzen van "vulling" en "vervanging" duidelijk te onderscheiden. Voor dit bijzondere geval kan men exacte wiskundige wetten afleiden voor de holle ruimte van het mengsel, als functie van de holle ruimte van de fijne fractie (ϵ_1), de grove fractie (ϵ_2) en de mengverhouding. Beide wetten zijn grafisch weergegeven in figuur 4.5. Deze grafiek toont de holle ruimte van het mengsel als functie van de concentratie van de grove fractie C_2 , voor het geval van een fijne fractie met 35 % holle ruimte en een grove fractie met 40 % holle ruimte.

De grafiek is als volgt te lezen:

- Vertrekkend van uitsluitend de fijne fractie (dat wil zeggen $C_2=0\%$), beschrijft de oranje lijn hoe de holle ruimte van het mengsel (ϵ_m) daalt wanneer men grote korrels gaat toevoegen (dat wil zeggen C_2 neemt toe). Dit is het gevolg van het mechanisme van *vervanging*.
- Vertrekkend van uitsluitend de grove fractie (dat wil zeggen $C_2=100\%$), beschrijft de blauwe lijn hoe de holle ruimte van het mengsel daalt wanneer men kleine korrels gaat toevoegen (dat wil zeggen C_2 neemt af). Deze daling is te verklaren door het mechanisme van *vulling*.
- Het snijpunt van beide curves treedt op aan de concentratie waarbij de fijne korrels de holle ruimte van de grove fractie volledig hebben gevuld. Dit punt, waarbij het ene schikkingsmechanisme overgaat in het andere, stemt overeen met de theoretisch minimale holle ruimte van het binair mengsel.

In het geval de verhouding D_1/D_2 niet verwaarloosbaar klein is, zal het inbrengen van korrels een geleidelijke verstoring veroorzaken van de schikking van de reeds aanwezige korrels. Het effect hiervan is een "verruiming" van het skelet, wat leidt tot een grotere holle ruimte in vergelijking met het geval waarbij $D_1/D_2 \approx 0$. In de grafische voorstelling uit dit zich in een verschuiving van de curves naar boven.



Figuur 4.5 – Holle ruimte in een binair mengsel met 2 korrelgroottes D_1 en D_2 , waarbij $D_1/D_2 \approx 0$

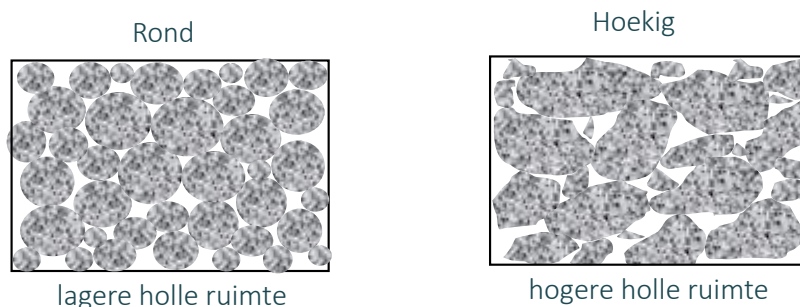
4.2.2 Veralgemening van de methode

De wetten van vulling en vervanging, zoals weergegeven in figuur 4.5, vormen de kern van de berekeningsmethode die werd ontwikkeld voor een mengsel van aggregaten, zoals voorkomend in een bitumineus mengsel. Het aggregaatmengsel wordt daartoe beschouwd als een mengsel van 10 korrelfracties, volgens stijgende korrelmaat: 0/0,063 mm, 0,063/0,125 mm, enz. tot de meest grove fractie 16/32 mm. Elke korrelfractie F_i ($i=1, \dots, 10$) wordt hierin gekenmerkt door een specifieke holle ruimte ϵ_i .

De holle ruimte van het volledige mengsel wordt vervolgens berekend door iteratieve toepassing van de binaire mengwetten, waarbij het fijne bestanddeel een gedeeltelijk mengsel is van de eerste fracties ($j=1, \dots, i-1$) en het grove bestanddeel de volgende fractie (i). Dit iteratieve proces start dus met de holle ruimte van de fijnste fractie en eindigt met de holle ruimte van het volledige mengsel.

Daarbij wordt rekening gehouden met:

- de verhouding van de gemiddelde korrelgroottes van de opeenvolgende fracties;
- de hoeveelheid van elke fractie, uitgedrukt als volumepercentage ten opzichte van het volledige aggregaatmengsel;
- de hoekigheid van elke fractie, die een impact heeft op de holle ruimte van de fractie omdat hoekige aggregaten een hogere holle ruimte laten dan ronde (figuur 4.6).



Figuur 4.6 – Invloed van de hoekigheid op de holle ruimte

Voor meer informatie over de iteratieve berekeningsmethode en de gebruikte formules wordt doorverwezen naar (Francken, 1991).

De concentraties van de fracties bepalen in elke iteratiestap welke schikkingswijze domineert en welke wet daardoor van toepassing is. Daardoor is deze methode geschikt voor zowel mengsels met een continue korrelverdeling als voor mengsels met een discontinue korrelverdeling. Een discontinuïteit in de korrelverdeling geeft aanleiding tot vulling, op voorwaarde dat de concentratie van de fijnere fracties voldoende klein is.

4.2.3 Invloed van de verdichting

De minerale korrels worden in de asfaltmenger omhuld met bitumineus bindmiddel. Dit resulteert in een los bulkmengsel dat verder op de bouwplaats wordt verdicht, waardoor de afstand tussen de minerale korrels geleidelijk afneemt. Het verdichtingsniveau en de wijze van verdichten hebben dus een invloed op de holle ruimte tussen de minerale korrels (VMA) in het omhulde en verdichte mengsel, en bijgevolg ook op de holle ruimte van het mengsel.

Deze invloed zit impliciet vervat in de berekeningsmethode van de VMA, via de specifieke holle ruimten ε_i ($i=1, \dots, 10$) van de deelfracties. De keuze van de specifieke holle ruimten van de deelfracties kan namelijk worden afgestemd op de verdichtingswijze en het verdichtingsniveau.

PradoWeb rekt met vaste waarden van de specifieke holle ruimten ε_i ($i=1, \dots, 10$), die optimaal zijn afgestemd op de holle ruimte gemeten met de gyrator. De gyrator is een verdichtings- en meetinstrument waarmee men in het laboratorium asfaltkernen verdicht, onder invloed van cyclische normale spanningen en schuifspanningen (Bijlage 1). Deze knedende verdichtingswijze simuleert de verdichting die op een bouwplaats optreedt onder invloed van een verdichtingswals. In de Belgische bestekken zijn er eisen gesteld aan de holle ruimte van gyratorkernen, waarbij de standaardkeuze van het aantal gyraties afhankelijk is van het mengseltype:

- 60 gyraties in geval van asfaltbeton (zandskeletmengsels)
- 100 gyraties in geval van AVS (Asfalt met Verhoogde Stijfheid)
- 120 gyraties in geval van SMA en ZOA (steenskeletmengsels)

De afstemming van de berekeningsparameters in PradoWeb op de holle ruimte, gemeten met de gyrator onder standaardcondities, vergemakkelijkt de interpretatie van de berekende resultaten. De berekende resultaten kunnen daardoor namelijk rechtstreeks worden getoetst aan de bestaande eisen in de Belgische bestekken.

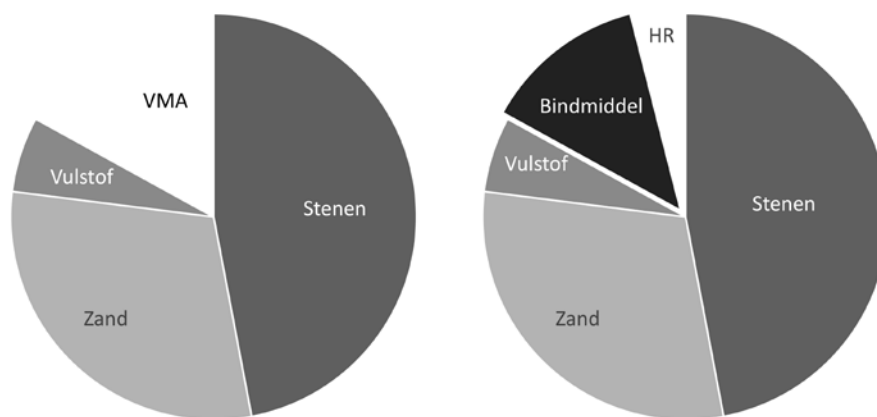
4.3 Bindmiddelvolume en holle ruimte

Zoals uitgelegd in § 4.1.2, moet het volume aan bindmiddel voldoende groot zijn voor een goede omhulling en een goede cohesie. Men merkt op dat, bij gebruik van asfaltgranulaat, het volume aan bindmiddel de som is van het volume aan nieuw bindmiddel en het bindmiddel reeds aanwezig in het asfaltgranulaat.

Wanneer echter het volume aan bindmiddel de VMA zou overschrijden, treedt overvulling op van het mineraal skelet, met een groot risico op instabiliteit als gevolg. De berekende VMA geeft dus een bovengrens voor het bindmiddelgehalte.

De holle ruimte in het mengsel volgt rechte reeks uit de berekende VMA en het volume bindmiddel:

Holle ruimte = VMA – volume bindmiddel



Figuur 4.7 – Mengselvolumetrie en verband tussen VMA, volume bindmiddel en holle ruimte

De holle ruimte mag niet te groot zijn. Een toename van de holle ruimte leidt tot een afname van de cohesie, een hogere gevoeligheid aan scheurvorming en een verhoogde watergevoeligheid. Dit betekent dat het volume bindmiddel voldoende groot moet zijn voor een goede omhulling van de minerale korrels en de duurzaamheid van het mengsel.

Het mengsel moet steeds een minimum aan holle ruimte bevatten. Dat betekent dat het volume bindmiddel absoluut kleiner moet zijn dan de VMA. Overvulling van de holle ruimte in het mineraal skelet door bindmiddel leidt tot tal van problemen, zoals:

- destabilisatie van het skelet, zodat het mengsel zeer gevoelig wordt aan vervorming;
- opstijgend bindmiddel (het zogenaamde “zweten” van de asfaltverharding), waardoor het wegdek zijn stroefheid verliest.

Een hogere holle ruimte komt vaak ook ten goede aan de weerstand tegen spoorvorming.

In de bestekseisen zijn er doorgaans een ondergrens voor het bindmiddelgehalte en een onder- en bovengrens voor de holle ruimte gespecificeerd.

4.4 Belang van de mastiekstijfheid

De vulstoffractie werd gedefinieerd als het gedeelte van het droog aggregaat dat door de zeef van 0,063 mm valt. Samen met het bindmiddel vormt het “de mastiek”. Bitumineuze mastiek gedraagt zich visco-elastisch, net zoals het bitumineuze bindmiddel dat er deel van uitmaakt. De stijfheid en de viscositeit zijn echter hoger, door de verstijvende werking van de vulstof.

Men kan een bitumineus mengsel ook beschouwen als een mengsel van zand en stenen, dat gebonden wordt door de mastiek, met andere woorden, de mastiek wordt beschouwd als het eigenlijke bindmiddel. In die rol is de consistentie van de mastiek uiterst belangrijk voor de prestatiekenmerken van het mengsel:

- Een mastiek met een lage stijfheid en viscositeit zal eerder aanleiding geven tot een mengsel met een lage stijfheid en weinig weerstand tegen blijvende vervorming. Dit verhoogt uiteraard het risico op spoorvorming.
- Een zeer stijve en viskeuze mastiek daarentegen, maakt het mengsel moeilijker verwerkbaar. De meng- en verdichtingstemperatuur van een bitumineus mengsel worden in praktijk namelijk gekozen als functie van de viscositeit van het bindmiddel (§ 3.4.1). Dit houdt geen rekening met de hoeveelheid vulstof of de aard van de vulstof, die het verstijvend effect en dus de stijfheid van de mastiek beïnvloeden.

Hieruit kan men afleiden dat de toename van de stijfheid en viscositeit ten gevolge van het toevoegen van de vulstof, ten opzichte van de stijfheid en viscositeit van het bitumen, binnen bepaalde grenzen moet blijven. Een te sterke toename kan leiden tot een slecht verwerkbaar mengsel, en een te zwakke toename tot een onvoldoende stijf en spoorvormingsgevoelig mengsel.

Daarom is het belangrijk om in het theoretisch mengselontwerp rekening te houden met dit verstijvend effect, en erop toe te zien dat het binnen bepaalde grenzen blijft.

De belangrijkste factoren die de stijfheid van de mastiek bepalen zijn:

1. de stijfheid van het bitumen;
2. de verhouding van het volume vulstof/bitumen: v_f/v_b ;
3. het verstijvend vermogen van de vulstof.

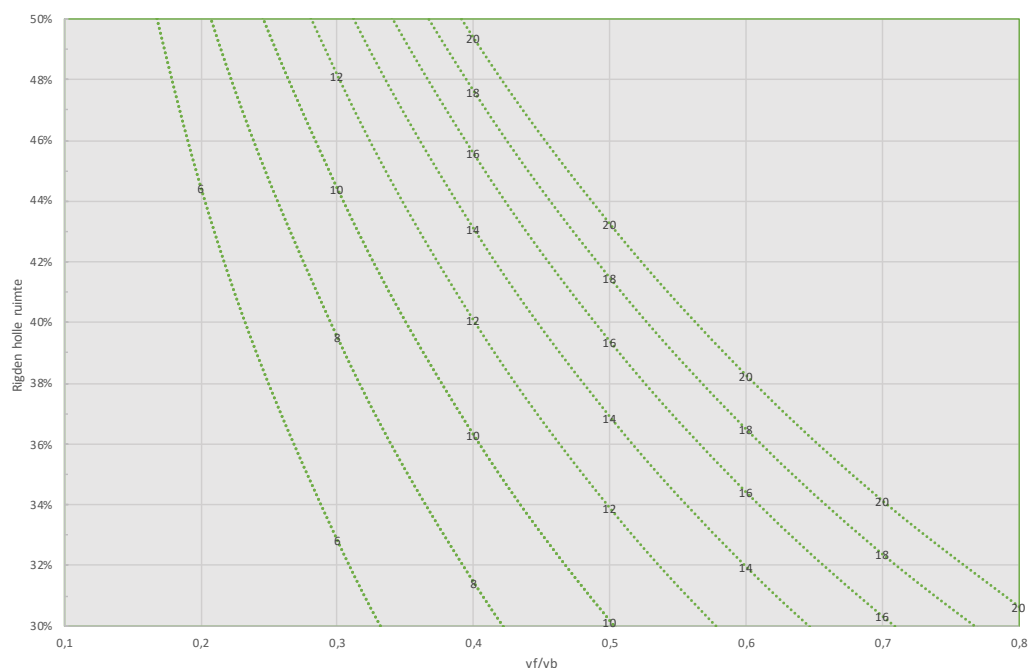
Het verstijvend vermogen van een vulstof kan worden gekenmerkt door middel van de Ring & Kogel proef op de mastiek, gevormd door de vulstof en een standaard wegebitumen, met een vaste verhouding v_f/v_b (NBN, 2013b). Het verschil tussen het verwekingspunt van de mastiek en het verwekingspunt van het bitumen is een maat voor het verstijvend vermogen van de vulstof.

Verscheidene studies op vulstoffen hebben geleid tot een uitgebreide databank met resultaten van de Ring & Kogel proef op mastieken. Daarbij werd vastgesteld dat er een correlatie is tussen het verstijvend vermogen en de holle ruimte van de vulstof, bepaald met de methode volgens Rigden.

Een fysisch gefundeerde semi-empirische formule voor de verhoging van het verwekingspunt Ring & Kogel, als functie van de holle ruimte volgens Rigden ($\text{voids}_{\text{Rigden}}$) en de volumeverhouding v_f/v_b , werd voor het eerst voorgesteld in (Francken & Moraux, 1985). De parameters in die formule werden zodanig bepaald dat de berekende waarden en de gemeten waarden van het verwekingspunt Ring & Kogel een zo goed mogelijke correlatie vertoonden voor een populatie van verschillende vulstoffen.

In de loop der jaren zijn er veel nieuwe en andersoortige vulstoffen op de markt gekomen en dit heeft geleid tot bijsturing van de formule, zodanig dat de correlatie optimaal bleef voor alle soorten vulstoffen die in de praktijk worden toegepast in bitumineuze mengsels. Deze semi-empirische formule laat toe om een eerste theoretische voorspelling te maken van de consistentie van de mastiek in een bitumineus mengsel, op basis van de volumeverhouding vulstof/bindmiddel in het mengsel en de Rigden holle ruimte van de vulstof in het mengsel, waarbij de vulstof het geheel is van alle fijne deeltjes (dat wil zeggen de doorval door de zeef van 0,063 mm).

Figuur 4.8 toont de lijnen van gelijke verhoging van het verwekingspunt, berekend als functie van de holle ruimte volgens Rigden ($\text{voids}_{\text{Rigden}}$) en de volumeverhouding v_f/v_b , aan de hand van de theoretische formule.



Figuur 4.8 – Lijnen van gelijke mastiekstijfheid (iso-MSI lijnen)

Het is belangrijk om de aandacht te vestigen op de volgende punten betreffende de norm EN 13179-1 (NBN, 2013b) voor de Ring & Kogel proef op mastieken, waarmee de formule werd bepaald. De proef is in principe bedoeld om het verstijvend vermogen van een aanvoervulstof te kenmerken, en daarom wordt de proef uitgevoerd met een standaard wegebitumen, opdat het resultaat onafhankelijk zou zijn van het bindmiddeltype, en met de vulstof afgezeefd door de zeef van 0,125 mm. Voor de mastiek, zoals voorkomend in het bitumineuze mengsel, geldt echter dat:

- men meestal te maken heeft met een ander bindmiddeltype, en dat in het geval van polymeerge-modificeerde bindmiddelen de verhoging van het verwekingspunt groter is.
- de vulstof geen zuivere aanvoervulstof is, maar een mengsel van de fijne deeltjes afkomstig van alle bestanddelen, waaronder desgevallend ook asfaltgranulaat.

Daaruit volgt dat de theoretisch voorspelde waarde van de mastiekstijfheid slechts een benadering is van wat de Ring & Kogel proef op de werkelijke mastiek van het mengsel, dat wil zeggen met het werkelijke bindmiddel en met de volledige vulstoffractie, zou geven. Toch geeft deze formule een nuttige indicatie voor de mastiekstijfheid in de fase van het theoretisch mengselontwerp. Daarom wordt in het kader van theoretisch mengselontwerp niet gesproken van “verhoging van het verwekingspunt Ring & Kogel”, maar van “mastiekstijfheidsindicator”, afgekort MSI.

4.5 Volumetrische optimalisatie

Samengevat verloopt de procedure voor theoretisch mengselontwerp volgens onderstaand schema:

1° Keuze van de bestanddelen

2° Samenstelling van het mineraal aggregaat en berekening van de holle ruimte in het mineraal aggregaat (VMA), rekening houdend met:

- het gewenste type mineraal skelet (steen-, zand- of vulstofskelet);
- de eisen aan de korrelverdeling van de van het volledige mengsel;
- eventuele eisen aan de korrelverdeling van de zandfractie.

3° Keuze van het bindmiddelgehalte en bepaling van de holle ruimte, rekening houdend met:

- het volume aan bindmiddel dat nodig is voor een goede omhulling en cohesie;
- de gewenste holle ruimte in het mengsel;
- de mastiekstijfheid, die afhangt van de volumeverhouding vulstof/bindmiddel en van de aarde van de vulstof;
- in geval er asfaltgranulaat aanwezig is: samenstelling en kenmerken van het bindmid-
delmengsel.

In elke stap moet desgevallend worden voldaan aan de geldende bestekseisen, die doorgaans grenzen aan de korrelverdeling, een minimaal bindmiddelgehalte en grenzen aan de holle ruimte voorschrijven.

Bovenstaand schema is dus een iteratief proces, waarbij in elke stap kan worden bijgestuurd:

- Indien men in stap 2 er niet in slaagt om een geschikte korrelverdeling te realiseren, zal men terugkeren naar de vorige stap om de keuze van de bestanddelen aan te passen.
- Vertrekkende van een gegeven samenstelling van het mineraal aggregaat, zal het in stap 3 niet steeds mogelijk zijn om gelijktijdig te voldoen aan alle voorwaarden. In dat geval zal men:
 - de samenstelling van het mineraal aggregaat wijzigen om de VMA bij te sturen (terug naar stap 2). Volgende wijzigingen leiden doorgaans tot een verhoging van de VMA:
 - verhoging van de meest grove fracties en verlaging (of zelfs weglaten) van een fijnere fractie, zodat de korrelverdeling meer discontinu wordt;
 - verlaging van het zand en/of vulstofgehalte.
 - indien een wijziging in de samenstelling van het mineraal aggregaat niet volstaat, zal men kiezen voor andere materialen (terug naar stap 1).

Dit proces laat toe om de volumetrie van het mengsel op theoretische wijze te optimaliseren, alvorens over te gaan naar de fase van de laboratoriumproeven.

Volgend hoofdstuk beschrijft de volledige mengselontwerpprocedure, waarin het theoretisch mengselontwerp kadert. Er wordt nog dieper ingegaan op het optimalisatieproces en de verschillende opties die er zijn om de mengselparameters in de gewenste richting te sturen. Ook de voorbeelden in hoofdstuk 7 zullen dit verder illustreren.

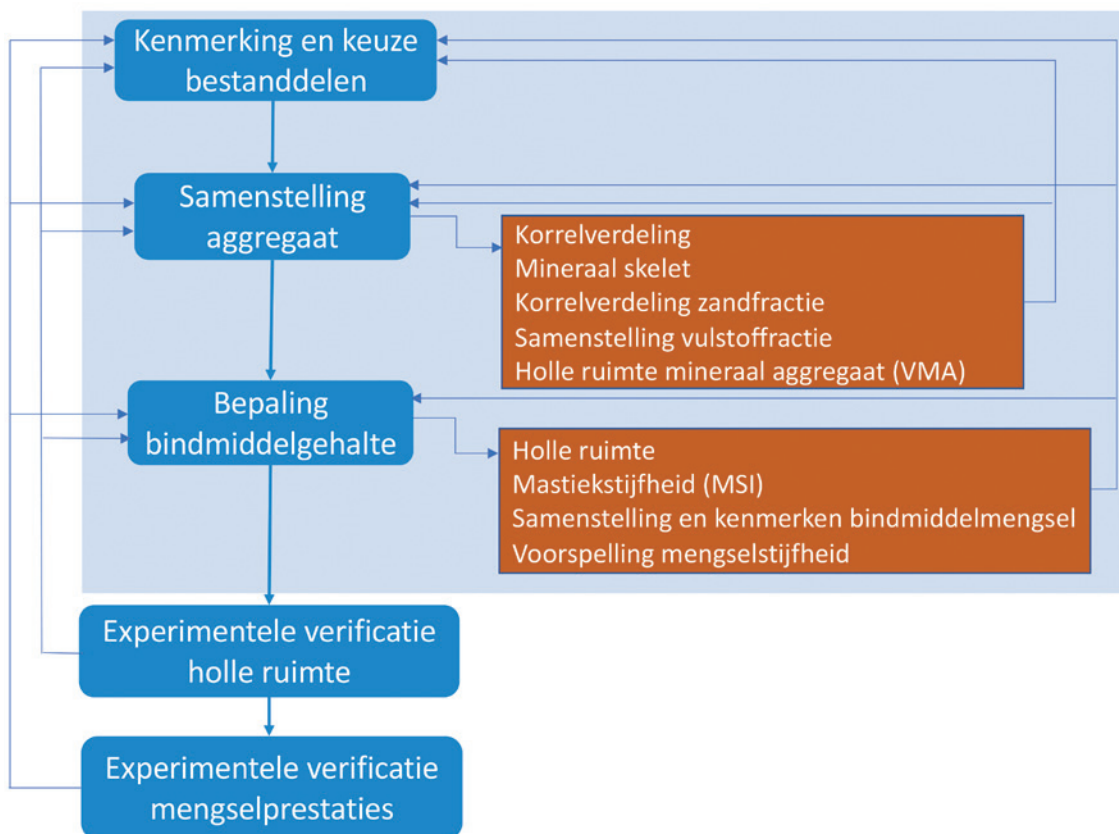


5. Procedure voor mengselontwerp

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende stappen van de procedure voor mengselontwerp, zoals aanbevolen door OCW. In elke stap is het belangrijk om de output op een juiste wijze te interpreteren, zodat van daaruit de logische vervolgstappen kunnen worden genomen.

Theoretisch mengselontwerp, zoals beschreven in hoofdstuk 4, is een essentieel onderdeel van de procedure voor mengselontwerp. Wanneer men beschikt over de juiste digitale hulpmiddelen, vraagt deze stap relatief weinig tijd en middelen, terwijl het leidt tot een vermindering van het aantal (herhaalde) proefproeven die nadien nog moeten worden uitgevoerd. De in dit hoofdstuk beschreven praktische procedure is afgestemd op PradoWeb, de digitale applicatie die de nodige berekeningen automatiseert en de gebruiker doorheen de theoretische ontwerpfase loodst.

Na het theoretisch ontwerp volgen de laboratoriumproeven, waarvan de resultaten moeten worden getoetst aan de vereisten (figuur 5.1).



Figuur 5.1 – Procedure mengselontwerp

Vanzelfsprekend is de allereerste fase, die voorafgaat aan het mengselontwerp, de keuze van de asfaltsoort. Deze keuze hangt af van de rol van het mengsel in de asfaltverharding (toplaag, onderlaag, profileerlaag, plaatselijke herstelling, enz.), de plaats van toepassing (snelweg, landbouwweg, parkeerplaats, enz.) en de vereisten op gebied van prestaties, veiligheid en comfort. Voor de keuze van de asfaltsoort wordt verwezen naar de betreffende OCW-handleiding (OCW, 2020). In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de ontwerpprocedure geïllustreerd aan de hand van een asfaltbeton voor onderlagen, met gebruik van asfaltgranulaat.

5.1 Kenmerking en keuze van de bestanddelen

De kenmerken van de grondstoffen moeten uiteraard gekend zijn en voldoen aan de voorschriften voor gebruik in bitumineuze mengsels.

De keuze van de bestanddelen hangt af van de asfaltsoort en de gewenste prestaties.

Asfaltgranulaat is een materiaal dat zich bij uitstek leent tot hergebruik in nieuwe mengsels, met behoud van de goede prestaties, op voorwaarde dat het asfaltgranulaat goed wordt beheerd en gekenmerkt, en dat het nieuwe mengsel met asfaltgranulaat juist is ontworpen. In het streven naar meer circulariteit in de wegenbouw is het dan ook vanzelfsprekend dat er maximaal gebruik wordt gemaakt van asfaltgranulaat.

PradoWeb omvat een module voor de invoer en het beheer van de kenmerken van de bestanddelen. Wanneer de kenmerken zijn ingevoerd, kunnen de materialen in verschillende mengsels worden aangewend.

De materialen zijn in PradoWeb onderverdeeld in zes soorten, zoals eerder besproken in hoofdstuk 3:

1. Steenslag: aggregaat dat voor het grootste deel door de zeef met maaswijdte D valt en blijft liggen op de zeef met maaswijdte d , met $d \geq 2$ (korrelmaat d/D).
2. Zanden: aggregaat dat voor het grootste deel door de zeef met maaswijdte D valt, met $D \leq 2$ mm (korrelmaat $0/D$).
3. Vulstoffen: fijn materiaal dat voor het grootste deel door de zeef van 0,063 mm valt. Hieronder vallen onder andere de aanvoervulstoffen, teruggewonnen vulstoffen en pigmenten.
4. Bindmiddelen: alle soorten nieuwe bindmiddelen (wegenbitumen, polymeergemodificeerd bitumen, synthetisch bindmiddel, enz.).
5. Asfaltgranulaat: granulaat herwonnen uit freesasfalt, bestaande uit aggregaat en oud bindmiddel.
6. Additieven: materialen in zeer kleine hoeveelheid toegevoegd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen:
 - Bindmiddeladditieven: additieven die samen met het bindmiddel een homogeen mengsel vormen. Verjongingsmiddelen en additieven voor asfalt bij verlaagde temperatuur behoren tot deze categorie.
 - Mengseladditieven: vaste additieven die niet oplossen in het mengsel. We denken hierbij bijvoorbeeld aan minerale afdruiptremmers.

Noot: Fijne korrelvormige materialen die bijdragen tot de korrelverdeling (bv. pigment, cement en kalkhydraat) worden ingevoerd als een vulstof, opdat hun impact op de korrelverdeling en de mastiekstijfheid in acht wordt genomen. Ook al is de hoeveelheid klein, worden ze beter niet ingevoerd als additief.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de kenmerken die verplicht moeten worden ingevoerd om de berekeningen te kunnen uitvoeren.

Soort bestanddeel	Kenmerk	Eenheid
Steenslag	Volumieke massa	Mg/m ³
	Korrelverdeling	%m
	Hoekigheid	-
Zanden	Volumieke massa	Mg/m ³
	Korrelverdeling	%m
	Hoekigheid	-
Vulstoffen	Volumieke massa	Mg/m ³
	Korrelverdeling	%m
	Holle ruimte volgens Rigden	%
Bindmiddelen	Volumieke massa	Mg/m ³
	Indringing (pen)	0,1 mm
	Verwekingstemperatuur Ring & Kogel (T _{R&K})	°C
Asfaltgranulaat	Korrelverdeling	%m
	Volumieke massa steenfractie	Mg/m ³
	Volumieke massa zandfractie	Mg/m ³
	Volumieke massa vulstoffractie	Mg/m ³
	Hoekigheid	
	Holle ruimte volgens Rigden vulstoffractie	%
	Bindmiddelgehalte	%m
	Volumieke massa oud bindmiddel	Mg/m ³
	Indringing oud bindmiddel (pen)	0,1 mm
	Verwekingpunt Ring & Kogel oud bindmiddel (T _{R&K})	°C
Additieven	Volumieke massa	Mg/m ³

Tabel 5.1 – Verplichte materiaalkenmerken voor het theoretisch mengselontwerp

5.2 Samenstelling van het aggregaat

Van zodra de bestanddelen zijn gekozen, wordt het aggregaat samengesteld, door aan te geven in welke verhouding de verschillende bestanddelen worden gemengd. In geval van asfaltgranulaat wordt uiteraard enkel de droge aggregaatfractie beschouwd.

In praktijk wordt de samenstelling in massapercentages uitgedrukt, gezien de bestanddelen in het laboratorium en in de asfaltcentrale worden afgewogen. De invoer in PradoWeb is dan ook voorzien in massapercentages. Voor een juist mengselontwerp wordt de samenstelling in PradoWeb omgerekend naar volumepercentages, zodat verder in termen van volumes kan worden gerekend.

De samenstelling van het aggregaat leidt tot de volgende resultaten.

5.2.1 Korrelverdeling van het aggregaat

Deze massapercentages en de korrelverdelingen van de verschillende droge bestanddelen bepalen de korrelverdeling van het droog aggregaatmengsel, in massapercentage doorval of in zeefrest. In geval van asfaltgranulaat wordt er gerekend met de korrelverdeling van het gewassen droog aggregaat. Deze korrelverdeling wordt de "witte korrelverdeling" genoemd, in tegenstelling tot de "zwarte korrelverdeling" van het asfaltgranulaat zelf.

De korrelverdeling in massapercentages moet worden omgerekend naar een korrelverdeling in volumepercentages, gezien de volumepercentages de structuur van het mineraal skelet en de VMA zullen bepalen. Deze berekening gebeurt op basis van de volumieke massa's van de verschillende bestanddelen.

In het geval van asfaltgranulaat is de omrekening van de korrelverdeling van het droog aggregaat naar volumepercentages minder eenvoudig, omdat het gaat om een heterogeen mengsel van korrels. De volumieke massa is dus niet dezelfde voor alle korrels en bijgevolg is de korrelverdeling van de droge fractie van het asfaltgranulaat niet dezelfde in massa- of in volumepercentages. PradoWeb laat toe de omrekening op een benaderende wijze te doen, gebruik makend van de volumieke massa's van de afzonderlijke steen-, zand- en vulstoffractie. Deze moeten dan wel bepaald zijn en ingevoerd als kenmerken van het asfaltgranulaat (tabel 5.1).

Voor de samenstelling van het aggregaat vertrekt men vaak van een gewenste of gekende korrelverdeling. Het objectief om een bepaalde korrelverdeling na te streven is om eenzelfde skeletstructuur te realiseren. Daarom moet de korrelverdeling in volumedelen zo goed mogelijk aansluiten bij de gewenste korrelverdeling in volumedelen. PradoWeb bevat een routine die automatisch de samenstelling berekent, met het oog op een gewenste korrelverdeling. Deze routine is niet enkel handig en snel, maar leert ook veel over de keuze van de bestanddelen. Mogelijk toont het resultaat dat het niet mogelijk is een goede benadering te vinden, wat wijst op een tekort aan een bepaald bestanddeel van een bepaalde korrelmaat. Anderzijds kan het resultaat tonen dat een bepaald bestanddeel overbodig is en kan worden weggelaten.

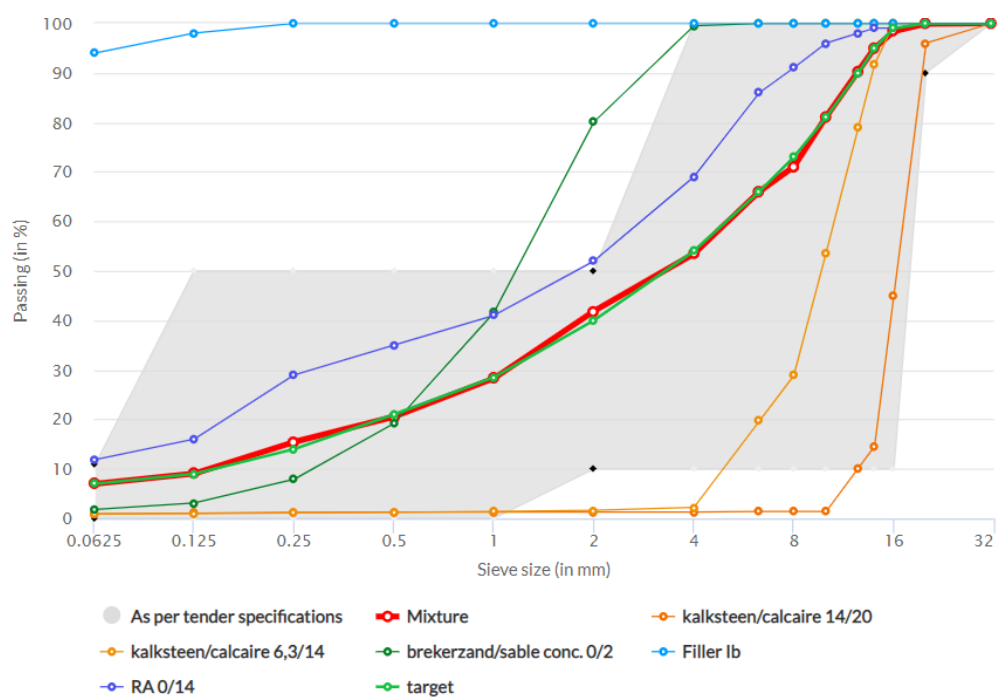
Figuur 5.2 toont een voorbeeld van een door PradoWeb berekende korrelverdeling in volumepercentages, voor een asfaltbeton voor onderlagen met 40 % van het aggregaat afkomstig van asfaltgranulaat. Deze korrelverdeling is het resultaat van de samenstelling van de droge aggregaten volgens de percentages in tabel 5.2, een samenstelling die in PradoWeb automatisch werd gegenereerd op basis van een streefkorrelverdeling (voorgesteld door de lichtgroene lijn in de grafiek). In dit voorbeeld is er slechts een heel beperkt verschil tussen massa- en volumepercentages, omdat de volumieke massa's van alle aggregaten onderling weinig verschillen.

De korrelverdeling van het droog aggregaat zal indien nodig worden getoetst aan bestekseisen. De eisen voor de asfaltsoorten die beschreven staan in de Belgische standaardbestekken zijn geïmplementeerd in PradoWeb, zodat indien gewenst de toetsing automatisch gebeurt, en het resultaat zowel numeriek als grafisch wordt weergegeven. De grijze zone in figuur 5.2 toont het gebied waarin de korrelverdeling moet vallen om te voldoen aan de eisen voor het mengseltype APO-A (Asfaltbeton met Prestatievereisten voor Onderlagen, volgens Vlaamse Overheid, AWW, 2021). PradoWeb toetst de korrelverdeling in volumepercentages aan de gestelde eisen, omdat het volume van de korrels, en niet hun massa, de structuur van het mineraal skelet bepaalt.

Nota: In de standaardbestekken zijn de eisen aan de korrelverdeling weergegeven in massapercentage. Daarbij wordt echter gepreciseerd dat, indien de volumieke massa van de aggregaten afwijkt van $2,65 \text{ Mg/m}^3$, de samenstellingen zo gecorrigeerd moeten worden dat dezelfde volumeverhouding aangehouden wordt. Deze correctie impliceert dat het eigenlijk de korrelverdeling in volumedelen is, die moet beantwoorden aan de bestekseisen. Dit is dan ook wat PradoWeb verifieert.

	volumieke massa (Mg/m^3)	massa%	volume%
kalksteen 14/20	2,692	2,2	2,2
kalksteen 6.3/14	2,670	32,6	32,6
brekerzand 0/2	2,704	23,9	23,6
vulstof Ib	2,683	1,6	1,6
RA 0/14	2,650	39,7	40,0
Totaal	2,671	100	100

Tabel 5.2 – Aggregaatsamenstelling voor het ontwerp van een mengseltype APO-A (volgens Vlaamse Overheid, AWW, 2021)



Figuur 5.2 – Korrelverdeling van de bestanddelen en het mengsel, getoetst aan de grenzen van het standaardbestek SB 250 v4.1a (Vlaamse Overheid, AWW, 2021) (grijze zone)

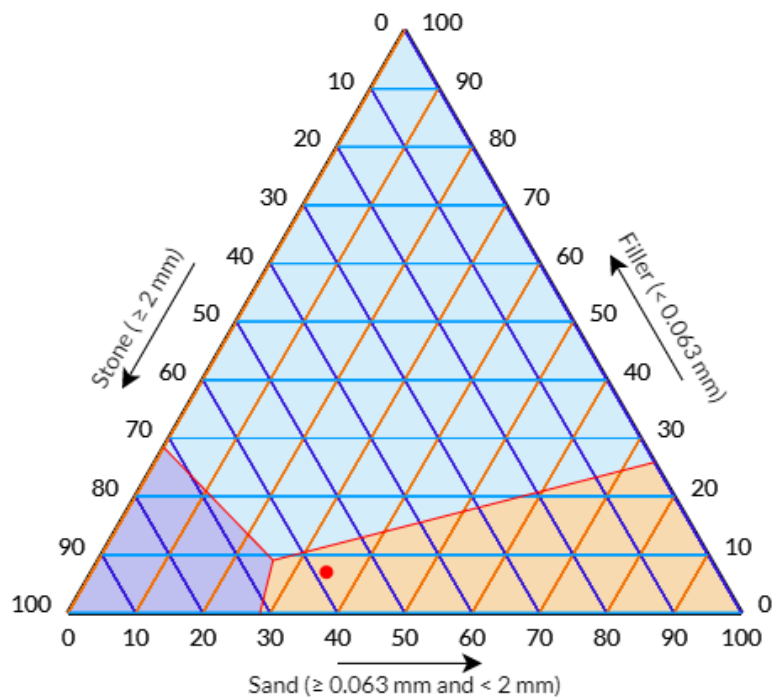
Wanneer de korrelverdeling van het mengsel niet voldoet aan de bestekseisen, moet de samenstelling van het droog aggregaat worden bijgestuurd. Indien dat niet volstaat, moet de keuze van de bestanddelen van het droog aggregaat worden herzien (§ 5.1).

5.2.2 Mineraal skelet

De korrelverdeling van het aggregaatmengsel laat toe om de mengselfamilie volgens mineraal skelet te identificeren, zoals beschreven in hoofdstuk 2. PradoWeb bevat een testroutine die de identificatie automatisch doet op basis van de volumes ingenomen door steen-, zand en vulstoffractie. De grafische weergave van het punt in het ternair diagram toont waar het mengsel zich situeert (figuur 5.3). Een mengsel dat dicht bij één der grenslijnen ligt kan kritisch zijn, omdat kleine wijzigingen in de korrelverdeling een verschuiving kunnen veroorzaken met grote impact op de prestaties.

Composition dry aggregate	in v%	Label	Color
% stone (≥ 2 mm)	58,15	Filler skeleton	Light Blue
% sand (≥ 0.063 mm and < 2 mm)	34,86	Sand skeleton	Orange
% filler (< 0.063 mm)	6,99	Stone skeleton	Purple

Skeleton Type Sand skeleton



Figuur 5.3 – Bepaling van het type mineraal skelet

5.2.3 Korrelverdeling van de zandfractie

De zandfractie van het droog aggregaat bestaat grotendeels uit de nieuwe zanden en, in het geval van het gebruik van asfaltgranulaat, de zandfractie van de asfaltgranulaten. Daarnaast is er ook een bijdrage van het zand aanwezig in het steenslag en de zeefrest op de zeef van 0,063 mm van de vulstoffen. In het bijzonder voor mengsels met een zandskelet, waarin de zandfractie het skelet vormt en de lasten moet verdelen, is het belangrijk dat de zandfractie evenwichtig is samengesteld met een continue korrelverdeling. Uitsluitend grof zand of uitsluitend fijn zand kunnen aanleiding geven tot problemen bij verwerking of instabiliteit van het skelet. Om die reden specificeren de Belgische standaardbestekken in het geval van sommige zandskeletmengsels ook eisen aan de korrelverdeling van de zandfractie. Deze worden indien gewenst ook automatisch getoetst in PradoWeb.

5.2.4 Samenstelling en kenmerken van de vulstoffractie

§ 4.4 handelde over de rol van de vulstof als bestanddeel van de mastiek en de wijze waarop de mastiektijfheid wordt bepaald door de kenmerken van de vulstof. Met name de holle ruimte van de vulstof en de volumieke massa zijn noodzakelijke kenmerken om de mastiektijfheidsindicator (MSI) te berekenen. De vulstoffractie van het droog aggregaat is echter een samenstelling van desgevallend nieuwe aanvoervulstof, herwonnen vulstof, het fijn stof van zanden en steenslag en de vulstoffractie van de asfaltgranulaten. Voor zover de kenmerken van deze individuele bestanddelen gekend zijn, wordt in PradoWeb via mengwetten een schatting gemaakt van de gemiddelde volumieke massa en de Rigden holle ruimte van de vulstoffractie, twee belangrijke parameters voor de voorspelling van de stijfheid van de mastiek. Tabel 5.3 toont de vulstofsamenstelling van het voorbeeldmengsel. De vulstoffractie bestaat voor 68 % uit de vulstof van het asfaltgranulaat. In § 5.3.2 wordt dieper ingegaan op de juiste beoordeling van de mastiektijfheid, die niet te laag, noch te hoog mag zijn.

Herkomst	in v% van droog aggregaat	in v% van vulstoffractie	Volumieke massa (in Mg/m ³)	Rigden HR
Aanvoervulstof	1,50 %	21,4 %	2,683	30.9 %
Vulstoffractie asfaltgranulaat	4,75 %	68,0 %	2,654	37.0 %
Vulstoffractie zanden en steenslag	0,74 %	10,6 %	2,690	33.0 %(1)
Totaal	7,00 %	100,0 %	2,665	35.3 %

(1) forfaitaire waarde voor de Rigden holle ruimte van de fijne deeltjes verkregen door ontstofting van zanden en stenen

Tabel 5.3 – Samenstelling van de vulstoffractie van het mengsel

5.2.5 Holle ruimte in het mineraal aggregaat (VMA)

De holle ruimte in het mineraal aggregaat wordt berekend volgens de methode beschreven in hoofdstuk 4, gebruik makend van de korrelverdeling in volumepercentages. Parameters in deze berekening zijn de specifieke holle ruimtes van de verschillende deelfracties, die voor de berekeningen in PradoWeb werden afgestemd op de standaardverdichting met de gyrator. De hoekigheden van de verschillende deelfracties, die volgen uit de hoekigheden van de bestanddelen en de proportionele samenstelling, worden aangewend om de specifieke holle ruimtes te corrigeren. Zo wordt de impact van de hoekigheid op de holle ruimte tussen de korrels mee in rekening gebracht.

Er zijn in de Belgische bestekken geen vereisten gesteld aan de VMA, gezien de VMA impliciet begrensd is door de vereisten aan het bindmiddelgehalte en de residuele holle ruimte. Indien men echter een mengsel wenst met een hoge holle ruimte en/of een hoog bindmiddelgehalte, moet men streven naar een hoge VMA, zodat er voldoende ruimte is om het bindmiddelvolumen te bevatten en nog voldoende holle ruimte te behouden. Hieronder volgen typische richtwaarden voor de VMA voor de belangrijkste mengseltypes:

Asfaltbeton voor onderlagen: 15 tot 20 %

Asfaltbeton voor toplagen: 17 tot 22 %

SMA: 20 tot 26 %

ZOA: 28 tot 32 %

Voor het asfaltbeton voor onderlagen in het voorbeeld berekent PradoWeb een waarde van 17,3 % voor de VMA.

5.3 Bindmiddelgehalte

Wanneer de samenstelling van het aggregaat is bepaald, rest nog de keuze van het bindmiddelgehalte.

Het bindmiddelgehalte wordt gekozen conform de bestekseisen, die afhangen van het type mengsel. Om praktische redenen worden in normen en bestekken de eisen aan het bindmiddelgehalte doorgaans uitgedrukt in massapercentage in het mengsel. Er zal echter altijd vermeld staan dat de eisen moeten worden gecorrigeerd met een factor gelijk aan $\frac{2,65}{\rho}$, met ρ de volumieke massa van het aggregaat. Voor aggregaten met een grotere/lagere volumieke massa dan $2,65 \text{ Mg/m}^3$ zal men dus minder/meer bindmiddel moeten doseren in massapercentage. Zo blijft het vereiste volume bindmiddel hetzelfde, ongeacht de volumieke massa van het aggregaat. PradoWeb doet deze correctie van de bestekseis voor het bindmiddelgehalte automatisch, op basis van de volumieke massa van het aggregaat. Zo ziet de ontwerper dadelijk of het bindmiddelgehalte dat hij invoert in massapercentage voldoet aan de bestekseisen.

Voor het asfaltbeton voor onderlagen in het voorbeeld, is de volumieke massa van het aggregaat slechts licht hoger dan $2,65 \text{ Mg/m}^3$, zodat de correctie op het minimale bindmiddelgehalte eerder klein is (4,56 % i.p.v. 4,6 %). Er wordt in dit voorbeeld verder gerekend met een bindmiddelgehalte van 4,7 %.

Het bindmiddelgehalte wordt vervolgens in PradoWeb omgerekend naar het volume dat het bindmiddel inneemt. Zodra het totale volume aan bindmiddel gekend is, worden ook de volgende grootheden berekend:

5.3.1 Holle ruimte

De holle ruimte volgt rechtstreeks uit de berekende VMA en het volume bindmiddel, uitgedrukt in percentage van het totaal volume: $\text{Holle ruimte} = \text{VMA} - \text{volume bindmiddel}$

Tabel 5.4 toont de resultaten voor het voorbeeld van een asfaltbeton voor onderlagen, waarvoor een VMA van 17,3 % werd berekend en een bindmiddelgehalte van 4,7 % werd gekozen.

	in m%	in v%
% stenen (≥ 2 mm)	55,3 %	48,1 %
% zand ($\geq 0,063$ mm en < 2 mm)	33,3 %	28,8 %
% vulstof ($< 0,063$ mm)	6,6 %	5,8 %
% bindmiddel	4,7 %	10,7 %
% holle ruimte	-	6,6 %

Tabel 5.4 – Samenstelling van het mengsel, in massa en in volumepercentages

De holle ruimte in dit voorbeeld voldoet aan de bestekseisen voor een mengsel type APO-A (3 % - 8 %). Indien de holle ruimte niet zou voldoen, kan het mogelijk volstaan om enkel het bindmiddelgehalte aan te passen.

Daarentegen kan het voorkomen dat bijvoorbeeld de holle ruimte onder de ondergrens valt, terwijl het bindmiddelgehalte ook aan de ondergrens zit. In dat geval moet de korrelverdeling worden bijgestuurd om de VMA te verhogen, en dit door wijzigingen in de samenstelling van het droog aggregaat (§ 5.2).

Volgende wijzigingen leiden meestal tot een verhoging van de VMA:

- verhoging van de meest grove fracties en verlaging (of zelfs weglaten) van een fijnere fractie, zodat de korrelverdeling meer discontinu wordt;
- verlaging van het zand en/of vulstofgehalte.

Indien deze aanpassingen niet volstaan om de VMA bij te sturen, zal men nog verder moeten terugkeren in de procedure en de keuze van de bestanddelen wijzigen (§ 5.1).

5.3.2 Mastiekstijfheid

De keuze van het bindmiddelgehalte en elke wijziging in de korrelverdeling of in de keuze van de basismaterialen (zoals hoger beschreven) zal ook een impact hebben op de mastiekstijfheid (MSI). Deze waarde hangt namelijk af van de verhouding van het volume van de vulstoffractie tot het volume van het bindmiddel (v_f/v_b) en de holle ruimte van de vulstoffractie ($voids_{Rigden}$) (§ 4.4).

Beide parameters zijn in deze fase van het theoretisch ontwerp gekend, wat toelaat de MSI te berekenen en te beoordelen. PradoWeb berekent automatisch de mastiekstijfheid en toont grafisch de waarde, als functie van de volumeverhouding v_f/v_b en de holle ruimte van de vulstoffractie volgens Rigden.

Voor een goed mengselontwerp moet men vermijden dat de MSI zich in een kritisch gebied bevindt. Zowel een te lage MSI (onvoldoende stijve en vervormingsgevoelige mastiek) als een te hoge MSI (moeilijke verwerkbaarheid) kunnen nefast zijn voor de mengselprestaties.

Het bereik waarbinnen de MSI bij voorkeur zou moeten liggen, verschilt naar gelang van het mengseltype. Voor asfaltbeton blijkt 15 tot 20 °C een gepast bereik te zijn. Voor SMA ziet men vaak dat de MSI hoger is. Dat is begrijpelijk, omdat SMA een mastiekrijk mengsel is. Een goede weerstand tegen spoorvorming vereist dan ook een hoge mastiekstijfheid. De hoeveelheid mastiek, en het feit dat SMA steeds machinaal wordt verwerkt, verklaren waarom verwerkbaarheid van SMA in praktijk meestal geen probleem stelt, ondanks de hoge mastiekstijfheid.

Indien de mastiekstijfheid te hoog is, zijn volgende opties mogelijk om de mastiekstijfheid te verlagen:

- Verhoging van het bindmiddelgehalte

Men dient er wel rekening mee te houden dat hierdoor ook de holle ruimte zal wijzigen en dat deze dus opnieuw moet worden geëvalueerd (§ 5.3.1).

- Verlaging van het vulstofgehalte

Dit vereist een bijsturing van de samenstelling van het droog aggregaat (§ 5.2). Dit heeft een impact op de VMA en bijgevolg op de holle ruimte, die opnieuw moet worden geëvalueerd.

- Wijziging van het vulstoftype

Hiervoor moet men terugkeren naar de keuze van de bestanddelen (§ 5.1). Men moet dan opteren voor een aanvoervulstof met een minder verstijvende werking, dat wil zeggen een vulstof met een lagere holle ruimte volgens Rigden. Wijziging van de vulstof zal ook een impact hebben op de VMA en bijgevolg op de holle ruimte, die opnieuw moet worden geverifieerd.

Met PradoWeb kunnen deze wijzigingen en de verificatie van hun impact op de mastiekstijfheid snel worden doorgevoerd.

5.3.3 Samenstelling en kenmerken van het bindmiddel

Bij gebruik van asfaltgranulaat, zoals in het voorbeeld, is het bindmiddel samengesteld uit nieuw en oud bindmiddel. Het percentage oud bindmiddel in het bindmiddelmengsel hangt af van het bindmiddelgehalte van het asfaltgranulaat en de hoeveelheid asfaltgranulaat in het mengsel. Dat laatste ligt vast van zodra de samenstelling van het droog aggregaat is gekozen.

Het percentage oud bindmiddel bepaalt dan onmiddellijk ook het percentage nieuw bindmiddel dat nodig is voor het totale bindmiddel.

Voor bepaalde mengseltypes stellen de bestekken een beperking aan de hoeveelheid asfaltgranulaat. Dat is gewoonlijk gespecificeerd als een maximum aandeel oud bindmiddel in het bindmiddelmengsel. De kwaliteit van het oud bindmiddel is immers de meest kritische factor voor de prestaties van het asfaltmengsel.

Wanneer in deze fase van het mengselontwerp blijkt dat het percentage oud bindmiddel in het bindmiddelmengsel te hoog is, heeft men volgende opties om bij te sturen:

- Mogelijks kan men het bindmiddelgehalte nog verhogen, zodat er verhoudingsgewijs meer nieuw bindmiddel zal zijn. Daarbij moet uiteraard opnieuw de holle ruimte van het mengsel worden geverifieerd (§ 5.3), alsook de MSI.
- Meestal zal men de hoeveelheid asfaltgranulaat moeten verlagen, wat neerkomt op een wijziging van de samenstelling van het droog aggregaat (§ 5.2).
- Men kan ook opteren voor een ander asfaltgranulaat, met een lager gehalte aan oud bindmiddel (§ 5.1).

In geval van warme toevoeging en voldoende meentijd, wordt in theorie aangenomen dat nieuw en oud bindmiddel zich volledig mengen. In dat geval kunnen de empirische kenmerken van het mengbitumen worden geschat door middel van de gekende mengwetten (§ 3.5.2).

Dat maakt het mogelijk om in het geval van wegenbitumina een theoretische schatting te maken van de pen-klasse waarin het mengbitumen valt. Indien het mengbitumen in een te lage (of te hoge) klasse valt, dan dient ofwel voor een nieuw bindmiddel van een hogere (of lagere) klasse worden gekozen, of voor een ander asfaltgranulaat.

Tabel 5.5 toont de resultaten voor het voorbeeld van het mengsel type APO-A. Het oud bindmiddel vertegenwoordigt ongeveer 46 % van het totale bindmiddel. Voor APO-A is er geen beperking op dit aandeel.

	m% in mengsel	m% in mengbitumen	Pen (in 0,1 mm)	T _{R&K} (in °C)
nieuw	2,54 %	54,1 %	68	47,3
oud	2,16 %	45,9 %	16	70,0
Totaal	4,70 %	100,0 %	35	57,7

Tabel 5.5 – Samenstelling en empirische kenmerken van het mengbitumen

5.3.4 Voorspelling van de mengselstijfheid

In voorgaande paragrafen werd toegelicht hoe men de samenstelling van het mengsel op theoretische wijze bepaalt en op welke wijze de samenstelling kan worden geoptimaliseerd met het oog op een gepaste volumetrie, dat wil zeggen een gepast volume aan aggregaten, bindmiddel en holle ruimte. Daarbij werd ook toegezien op andere belangrijke parameters, zoals de mastiekstijfheid en de samenstelling van het bindmiddel bij gebruik van asfaltgranulaat.

Theoretische voorspelling van resultaten van prestatieproeven is, met de huidige theoretische modellen en met de beperkte kennis van de parameters die hiervoor nodig zijn, vooralsnog onvoldoende betrouwbaar. Daarom is het nodig om in een volgende fase over te gaan op proeven om de prestaties van het mengsel juist te beoordelen.

De mengselstijfheid kan wel met een zekere betrouwbaarheid worden ingeschat, gebruik makend van de formule (Francken & Vanelstraete, 1996):

$$\log\left(\frac{E^*}{E_\infty}\right) = \log\left(\frac{G_b^*}{G_{b\infty}}\right) \left[1 - 1.35 * \left(1 - \exp\left(-0.13 * \frac{v_{agg}}{v_b}\right) \right) * (1 + 0.11 * \log\left(\frac{G_b^*}{G_{b\infty}}\right)) \right] \quad (5.1)$$

waarbij:

E^* : de stijfheidsmodulus van het mengsel, bij een bepaalde temperatuur en frequentie

G_b^* : de afschuifmodulus van het bindmiddel, bij de overeenstemmende temperatuur en frequentie

E_∞ : de zogenaamde glasmodulus van het mengsel, dat wil zeggen de modulus die wordt benaderd bij zeer lage temperatuur en hoge frequentie, en die afhangt van de volumetrische samenstelling volgens:

$$E_\infty = 14360 * \left(\frac{v_{agg}}{v_b}\right)^{0.55} * \exp(-0.0584 * HR) \quad (\text{in MPa}) \quad (5.2)$$

waarbij:

v_{agg}/v_b : de verhouding van het volume aggregaat op het volume bindmiddel

HR: de holle ruimte van het mengsel

$G_{b\infty}$: de glasmodulus van het bindmiddel, dat wil zeggen de afschuifmodulus die wordt benaderd bij zeer lage temperatuur en hoge frequentie

De afschuifmodulus van het bindmiddel kan worden bepaald via een DSR-meting (Bijlage 2), en kan rechtstreeks worden ingevoerd in PradoWeb als materiaalkenmerk, voor elke combinatie van temperatuur en frequentie. Voor wegebitumen kan de afschuifmodulus bij benadering worden afgeleid uit de empirische kenmerken ρ_n en $T_{R\&K}$ via het nomogram van Van der Poel (Hunter et al., 2015).

Deze formules zijn geïmplementeerd in PradoWeb, zodat de impact van wijzigingen in de materiaalkeuze en/of de samenstelling op de mengselstijfheid kan worden ingeschat. Verificatie nadien door een stijfheidsproef blijft echter noodzakelijk.

5.4 Experimentele verificatie van de holle ruimte

Van zodra het mengsel op theoretische wijze is geoptimaliseerd, kan worden overgegaan op de laboratoriumproeven.

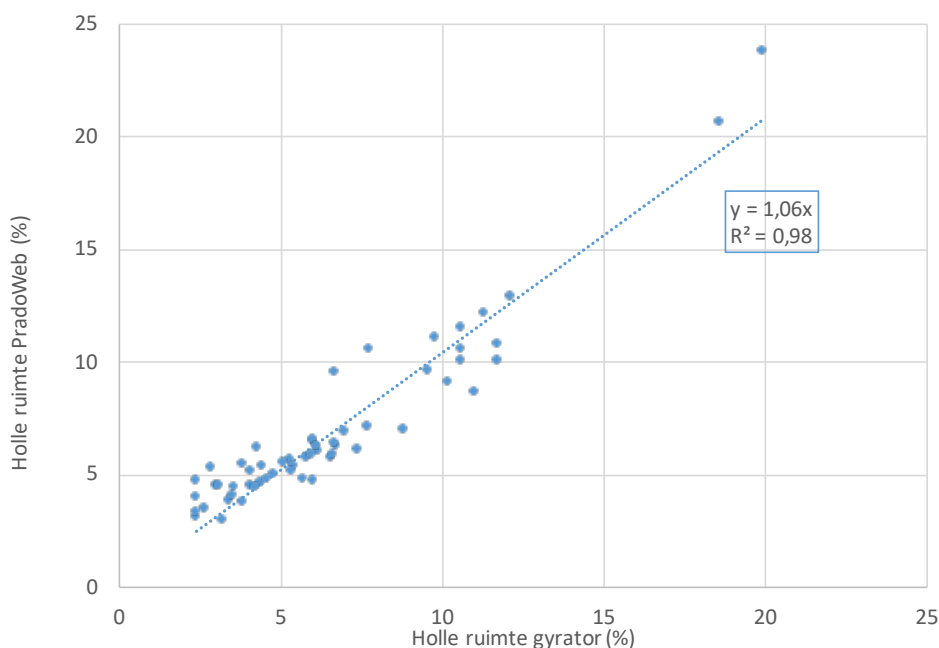
De holle ruimte is een volumetrisch kenmerk dat van cruciaal belang is voor alle prestatiekenmerken van het mengsel. Daarom is de eerste proef steeds de gyatorproef, die toelaat om de berekende holle ruimte van het mengsel te verifiëren.

Zoals eerder uitgelegd in § 4.2.3, is de berekening van de VMA en bijgevolg ook de holle ruimte in PradoWeb afgestemd op de gyatorverdichting. De theoretisch berekende holle ruimte kan dus rechtstreeks worden getoetst aan het meetresultaat van de gyatorproef.

De correlatie tussen de berekende en de gemeten holle ruimte is vrij goed, zoals weergegeven in figuur 5.4. Deze grafiek maakt gebruik van data van verschillende soorten mengsels die recent zijn beproefd in de gyator van OCW, en berekend met behulp van de PradoWeb applicatie. De richtingscoëfficiënt bedraagt ongeveer 1 en de correlatie is vrij goed, rekening houdend met de nauwkeurigheid van de invoerdata (kenmerken van de bestanddelen), de beperkingen van het theoretische model en de meetonzekerheid van de gyatorproef.

De theoretische voorspelling van de holle ruimte is vooral nuttig, omdat het toelaat de impact van bepaalde wijzigingen te voorspellen. Indien zou blijken dat de holle ruimte in de gyatorproef moet verschuiven in een bepaalde mate en richting, dan volstaat het meestal om het theoretisch ontwerp bij te sturen, zodanig dat de berekende holle ruimte verschuift in dezelfde mate en richting.

Indien de ontwerper steeds met dezelfde gyator werkt en daarbij vaststelt dat de afwijking tussen de berekende en de gemeten holle ruimte systematisch is, dan kan hij tijdens het theoretisch ontwerp reeds anticiperen op deze systematische afwijking, die eigen is aan het gebruikte meettoestel.



Figuur 5.4 – Correlatie tussen berekende en gemeten holle ruimte

5.5 Experimentele verificatie van de mengselprestaties

In de laatste fase van het mengselontwerp wordt overgegaan op de experimentele verificatie van de mengselprestaties die, afhankelijk van het mengseltype en de toepassing, moeten voldoen aan bepaalde vereisten.

Wanneer de proefresultaten beantwoorden aan de gestelde vereisten, is het mengselontwerp beëindigd. Zo niet, dient men na te denken op welke wijze het mengselontwerp het best kan worden bijgestuurd om de prestatie(s) te verbeteren. Daarvoor is het nodig om een goed begrip te hebben van de impact van de bestanddelen en de volumetrie op alle mengselprestaties. Dat is het onderwerp van het volgende hoofdstuk.

Wanneer men in deze fase alsnog het mengselontwerp moet bijsturen, zal men steeds terug keren naar de theoretische ontwerpfase. PradoWeb maakt het mogelijk om snel wijzigingen aan te brengen, of het gaat om het bijsturen van de samenstelling of om een andere keuze van één of meer bestanddelen. Zo kan men snel de impact van de wijziging op de volumetrie en de mastiekstijfheid doorrekenen en verifiëren, vooraleer de proeven te hernemen. Het is hierbij belangrijk van steeds alle cruciale parameters die hoger werden beschreven in het oog te houden.

6. Impact van bestanddelen en volumetrie op mengselprestaties

Dit hoofdstuk beschrijft de impact van de kenmerken van de bestanddelen en van de volumetrische samenstelling op de belangrijkste prestatiekenmerken. Een goed begrip van deze impact is noodzakelijk:

- om de gevolgen te voorspellen van keuzes die men maakt tijdens het theoretisch mengselontwerp;
- om te weten welke opties er zijn om het mengsel bij te sturen, in het geval het mengsel niet voldoet aan de gestelde prestatievereisten.

Het is dus belangrijk om met de hierna aangegeven elementen rekening te houden bij het initieel theoretisch mengselontwerp, bij het bijsturen van het ontwerp op basis van de resultaten van de verschillende prestatieproeven en bij verdere bijsturingen die nodig zijn (bv. als gevolg van wijzigingen in de kenmerken van de materialen nadien).

De overzichtstabel 6.1 op het einde van dit hoofdstuk toont per prestatiekenmerk de belangrijkste parameters die een invloed hebben. Deze tabel geeft daarmee ook aan wat de mogelijke gevolgen zijn van een bepaalde keuze voor de andere prestaties.

Daarnaast zijn er ook tal van mogelijke additieven die een impact hebben op de prestatiekenmerken, zoals adhesieverbeteraars of verjongingsmiddelen. Toevoeging van dergelijke additieven laat toe om bepaalde prestatiekenmerken te verbeteren, zonder verdere wijziging van het mengselontwerp. Het bespreken van de soorten additieven en hun impact op de mengselprestaties zou te ver leiden en bovendien snel achterhaald zijn, gezien de vele nieuwe ontwikkelingen in dit domein.

De OCW-handleiding (OCW, 2020) gaat dieper in op het belang van de prestatiekenmerken, naargelang de mogelijke toepassingen van het mengsel.

6.1 Verwerkbaarheid en verdichtbaarheid

Verwerkbaarheid kan men omschrijven als het gemak waarmee een mengsel wordt gespreid en afgewerkt op de bouwplaats. Verwerkbaarheid is vooral belangrijk wanneer er handmatige verwerking aan te pas komt.

Na het spreiden moet het mengsel worden verdicht, waarbij de holle ruimte afneemt en het contact tussen de aggregaten toeneemt. Verdichtbaarheid is het gemak waarmee het mengsel kan worden verdicht.

Verwerkbaarheid en verdichtbaarheid zijn cruciale mengseleigenschappen, omdat ze de kwaliteit van de productie en uitvoering bepalen. Ze worden in deze handleiding besproken, omdat ze in belangrijke mate worden beïnvloed door het mengselontwerp.

Voor een goede verwerkbaarheid en verdichtbaarheid zal men ervoor zorgen dat de consistentie (stijfheid en viscositeit) van het bindmiddel voldoende laag is en dit door de keuze van een mengtemperatuur en verdichtingstemperatuur, die aangepast zijn aan het bindmiddel: hoe harder het bindmiddel, hoe hoger de temperaturen. Echter, zodra het bindmiddel zich mengt met de vulstof, is het de mastiek die de verdere verwerkbaarheid en verdichtbaarheid in grote mate bepaalt. Daarom is de mastiekstijfheidsindicator (MSI) zo belangrijk voor verwerkbaarheid en verdichtbaarheid. Een te hoge MSI kan leiden tot problemen bij de productie en de uitvoering van de asfaltverharding.

Op dit ogenblik is er nog geen gevalideerde proefmethode voorhanden om de verwerkbaarheid te meten in het laboratorium. Verdichtbaarheid kan worden bepaald met de gyratorproef (Bijlage 1).

Om de verwerkbaarheid en verdichtbaarheid van een mengsel te verbeteren, kan men de volgende keuzes maken.

Bindmiddel

Een bindmiddel met een lage viscositeit in het gebied van de verdichtings- en verwerkingstemperaturen zal de verwerkbaarheid verbeteren.

Bindmiddelgehalte

Een hogere hoeveelheid bindmiddel verhoogt de hoeveelheid mastiek en de verhouding bindmiddel/vulstof, waardoor de mastiekstijfheid vermindert. Dat heeft een duidelijk gunstig effect op de verwerkbaarheid.

Hoekigheid aggregaat

Ronde korrels rollen gemakkelijker over elkaar dan hoekige, zodat een verhoging van de verhouding rond zand/brekerzand de verwerkbaarheid verbetert.

Korrelverdeling

Een hogere verhouding zand/stenen bevordert de verwerkbaarheid omdat de grote hoeveelheid zandkorrels ervoor zorgen dat de stenen gemakkelijker over elkaar "rollen" tijdens de menging en verdichting. Zandskeletmengsels zijn daarom gewoonlijk gemakkelijker verwerkbaar en beter geschikt voor manuele verwerking dan steenskeletmengsels.

Mastiekstijfheid

Naarmate het bindmiddel zich mengt met de vulstof is het de mastiek die de rol van smeermiddel opneemt. Een lage mastiekstijfheid in het gebied van de verwerkings- en verdichtingstemperaturen bevordert dus de verwerkbaarheid en verdichtbaarheid. Dit kan worden bewerkstelligd door één of meer van de volgende aanpassingen (§ 4.4):

- een aangepaste keuze van het bindmiddel (§ 6.1.1);
- verhoging van het bindmiddelgehalte (§ 6.1.2);
- verlaging van het vulstofgehalte;
- de keuze voor een vulstof die minder verstijvend werkt, dat wil zeggen een vulstof met lagere Rigden holle ruimte.

Asfaltgranulaat

Het gebruik van asfaltgranulaat heeft geen systematische impact op de verwerkbaarheid of verdichtbaarheid. De impact zal afhangen van de kwaliteit en de eigenschappen van het asfaltgranulaat en van het mengselontwerp. De eigenschappen van het asfaltgranulaat met de grootste impact op verwerkbaarheid en verdichtbaarheid zijn:

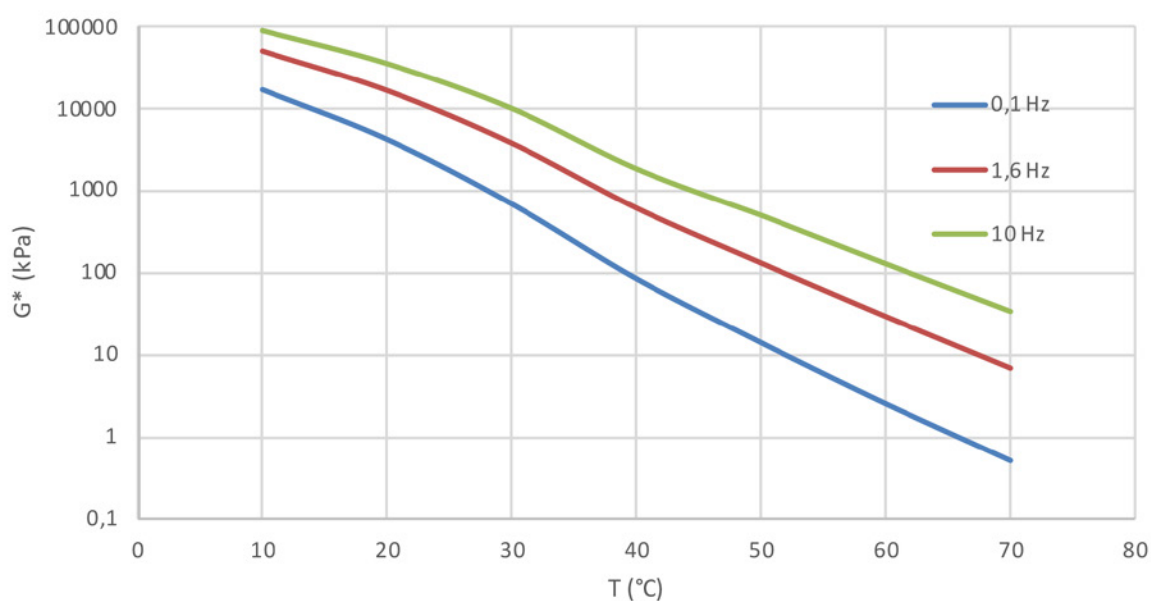
- de bindmiddelviscositeit, die gewoonlijk zeer hoog is voor het verouderd bindmiddel;
- de hoekigheid van de korrels, die kan afnemen door slijtage, frezen, zeven en verdere behandeling van het asfaltgranulaat.

6.2 Stijfheid

Stijfheid is een materiaalkenmerk dat zegt in welke mate een materiaal weerstand biedt aan vervorming onder invloed van een mechanische belasting. Stijfheid wordt gekenmerkt door de stijfheidsmodulus, zijnde de verhouding tussen de grootte van de spanning en de grootte van de vervorming (eenheid: N/m² of Pa).

De stijfheid van bitumen hangt sterk af van de temperatuur en de frequentie van de belasting. Een dynamische reometer (DSR), waarin het bindmiddel wordt onderworpen aan een sinusvormige belasting in afschuifmode, laat toe de stijfheid in afschuiving (afschuifmodulus) te meten als functie van de temperatuur en de frequentie (NBN 2012a, Bijlage 2).

Figuur 6.1 toont het resultaat van een DSR-meting. Maximale stijfheid wordt bereikt bij zeer lage temperatuur en hoge frequentie en wordt gekenmerkt door de zogenaamde "glasmodulus".



Figuur 6.1 – Afschuifmodulus (stijfheidsmodulus in afschuiving) van een bitumineus bindmiddel als functie van temperatuur en frequentie

De stijfheid van een bitumineus mengsel hangt af van de stijfheid van de bestanddelen en de volumetrische samenstelling. Gezien het aggregaat veel stijver is dan het bindmiddel, kan het aggregaat worden beschouwd als onvervormbaar en zijn enkel de bindmiddelstijfheid en de volumetrie bepalend voor de mengselstijfheid. Dat heeft het mogelijk gemaakt om een empirische formule voor de mengselstijfheid af te leiden, op basis van de bindmiddelstijfheid, de holle ruimte van het mengsel en de verhouding van het volume aggregaat tot het volume bindmiddel (v_{agg}/v_b) (Francken & Vanelstraete, 1993) (§ 5.3.4).

In België wordt gebruik gemaakt van een tweepuntsbuigproef op trapezoidale proefstukken om de stijfheid te bepalen van bitumineuze mengsels (NBN, 2018c, Bijlage 1).

De mengselstijfheid wordt beïnvloed door de volgende keuzes:

Bindmiddel

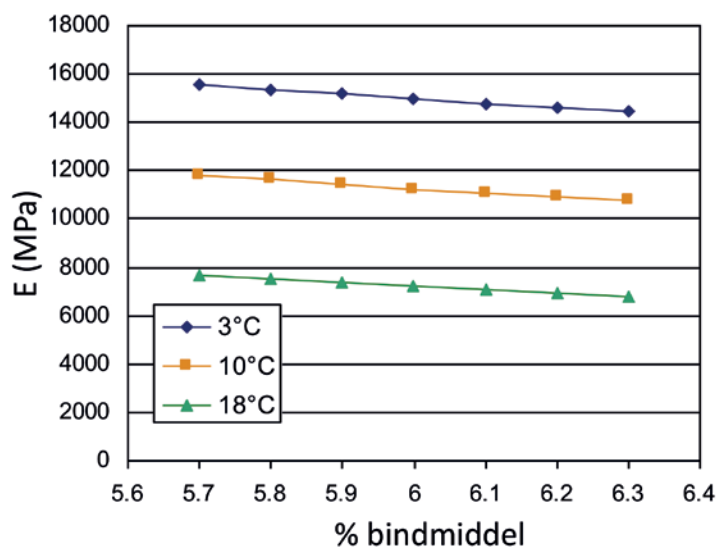
Een hogere bindmiddelstijfheid resulteert vanzelfsprekend in een hogere mengselstijfheid (§ 5.3.4).

In het geval van wegenbitumen is de pen-klasse indicatief voor de stijfheid. Voor de overige bindmiddelen zal worden gekeken naar de afschuifmodulus, bij de overeenkomstige temperatuur en frequentie.

Bitumineuze mengsels vertonen bijgevolg een hoge stijfheid onder koude weersomstandigheden en een lagere stijfheid in warme periodes, omwille van de temperatuurafhankelijkheid van het bindmiddel. Deze temperatuurafhankelijkheid kan worden beperkt door het gebruik van een bindmiddel dat minder temperatuurafhankelijk is. Polymeergemodificeerde bindmiddelen zijn in dat opzicht een goede keuze.

Bindmiddelgehalte

Voor eenzelfde samenstelling van het mineraal aggregaat, dat wil zeggen eenzelfde VMA, zal een hoger bindmiddelgehalte leiden tot een lagere holle ruimte en een lagere volumeverhouding v_{agg}/v_b . Dit resulteert in een lagere mengselstijfheid (figuur 6.2). Merk op dat dit effect eerder beperkt is.



Figuur 6.2 – Impact van het bindmiddelgehalte op de mengselstijfheid, voor gelijke samenstelling van het mineraal aggregaat

Holle ruimte

Indien de holle ruimte toeneemt door een vermindering van het bindmiddelgehalte, terwijl de VMA constant blijft, resulteert dat in een hogere mengselstijfheid.

Indien echter het bindmiddelgehalte constant blijft, is de hogere holle ruimte het gevolg van een hogere VMA of een minder goede verdichting, wat dan weer leidt tot een minder stijf mengsel. De impact van de holle ruimte op de mengselstijfheid is dus niet éénduidig.

Mastiekstijfheid

Een verhoging van de mastiekstijfheid verhoogt ook de mengselstijfheid. Dat kan worden bereikt door de keuze voor een bindmiddel met hoge stijfheid en/of verlaging van het bindmiddelgehalte (zie hierboven). Andere opties zijn het verhogen van het vulstofgehalte of kiezen voor een meer verstijvende vulstof, dat wil zeggen een vulstof met hogere Rigden holle ruimte.

Asfaltgranulaat

Verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat kan de mengselstijfheid verhogen of verlagen, afhankelijk van de kenmerken van het asfaltgranulaat.

Omwille van de veroudering heeft het oud bindmiddel meestal een hogere stijfheid dan het nieuw bindmiddel, en zal de stijfheid doorgaans toenemen naarmate men meer asfaltgranulaat gebruikt.

Dat is echter niet steeds het geval. Indien het nieuw bindmiddel ook een zeer hoge stijfheid heeft, zoals in het geval van AVS (Asfalt met Verhoogde Stijfheid), kan het voorkomen dat het gebruik van asfaltgranulaat de mengselstijfheid verlaagt in plaats van verhoogt.

Naast de bindmiddelkenmerken hebben ook de vulstofkenmerken een invloed op de stijfheid. Wanneer een aanvoervulstof met hoge Rigden holle ruimte (dat wil zeggen een vulstof met sterk verstijvend vermogen) deels vervangen wordt door de zwakkere vulstof aanwezig in het asfaltgranulaat, kan dat ook lijden tot een afname van de mengselstijfheid.

6.3 Spoorvormingsweerstand

Spoorvorming is het fenomeen van blijvende vervorming als gevolg van herhaalde wielovergangen. Het manifesteert zich hoofdzakelijk in warme periodes, wanneer het bindmiddel het meest gevoelig is aan blijvende vervorming, en op plaatsen met zwaar en traag verkeer. Spoorvormingsweerstand wordt dan ook sterk bepaald door het reologisch gedrag van het bindmiddel bij de hogere gebruikstemperaturen en lage frequenties. Daarnaast speelt ook de stabiliteit van het mineraal skelet een cruciale rol.

De weerstand tegen spoorvorming wordt in het laboratorium gemeten met een verkeerssimulator, waarin twee plaatvormige proefstukken worden onderworpen aan herhaalde wielovergangen bij een hogere temperatuur (in België 50 °C) (NBN, 2020b, Bijlage 1).

Een hoge weerstand tegen spoorvorming kan men realiseren door volgende keuzes te maken:

Bindmiddel

Voor wegenbitumen is het verwekingspunt $T_{R\&K}$ een goede indicator: hoe hoger dit verwekingspunt, hoe beter de weerstand tegen vervorming in het kritische temperatuurgebied waarin spoorvorming optreedt.

Het gebruik van polymeergemodificeerde bindmiddelen heeft een zeer gunstig effect op de spoorvormingsweerstand. Dat komt deels door hun stijfheid, die beter wordt behouden bij hogere temperaturen, maar vooral door hun vermogen tot elastisch herstel wanneer de belasting wordt weggenomen. Het verwekingspunt $T_{R\&K}$ is in het geval van polymeergemodificeerde bindmiddelen minder geschikt als indicator. Voor een meer precieze beoordeling van de weerstand tegen blijvende vervorming van polymeergemodificeerde bindmiddelen en andere bindmiddelsoorten zal men zich baseren op specifieke proeven, zoals de MSCR-test (*Multiple Stress Creep and Recovery test*) (NBN, 2016c, Bijlage 2).

Bindmiddelgehalte

Gezien het bindmiddel het meest vervormingsgevoelige bestanddeel is, moet het gehalte zo laag mogelijk worden gehouden, wil men een mengsel met een hoge weerstand tegen spoorvorming ontwerpen.

Korrelverdeling

Mengsels met een discontinue korrelverdeling en een hoge steenfractie bieden doorgaans een hogere weerstand tegen vervorming. De discontinuïteit wordt gerealiseerd door het beperkt houden of weglaten van een bepaalde fractie, meestal de fractie tussen 2 en 4 mm of tussen 2 en 6,3 mm, afhankelijk van de maximale korrelmaat. Dat verzekert een goede onderlinge blokkering van de hoekige steenkorrels en een stabiel skelet.

Hoekigheid aggregaat

Hoe hoekiger het aggregaat, hoe beter de weerstand tegen vervorming. Hoekigheid verhindert namelijk de relatieve beweging van de korrels en is daarom cruciaal voor de stabiliteit van het mineraal skelet.

Mastiekstijfheid

Een hoge mastiekstijfheid zorgt voor lage vervorming en verhindert daardoor de relatieve verplaatsing van de minerale korrels. Hoge mastiekstijfheid kan worden bereikt door één of meerdere van de volgende aanpassingen: hoge bindmiddelstijfheid, verlaging van het bindmiddelgehalte, verhoging van het vulstofgehalte of de keuze voor een sterkere vulstof (hogere Rigden holle ruimte).

Asfaltgranulaat

Verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat heeft in vele gevallen een positief effect op de spoorvormingsweerstand, omdat de veroudering van het bindmiddel heeft geleid tot een verhoging van het verwekingspunt $T_{R\&K}$.

In het geval het nieuwe bindmiddel echter ook een zeer hoge weerstand tegen vervorming heeft, zoals in het geval van asfalt met verhoogde stijfheid (AVS), kan het voorkomen dat het gebruik van asfaltgranulaat een nadelig effect heeft op spoorvorming.

Verder kan ook de hoekigheid van het aggregaat een rol spelen. Asphaltgranulaat is mogelijk minder hoekig, als gevolg van slijtage, frezen en verdere behandeling, wat ook een nadelig effect kan hebben op de spoorvormingsweerstand.

Wanneer de keuze van het nieuwe bindmiddel is afgestemd op de kenmerken van het oud bindmiddel, zodanig dat het mengbitumen volgens de mengwetten binnen eenzelfde klasse blijft, zou men geen grote impact verwachten van het gebruik van asphaltgranulaat. Voorzichtigheid is echter geboden wanneer men kiest voor een zeer zacht nieuw bitumen: wanneer er geen goede menging is met het oude harde bindmiddel, blijft er een zeer zachte en vervormingsgevoelige fase aanwezig, wat zeer nadelig is voor de weerstand tegen spoorvorming.

6.4 Watergevoeligheid

Water heeft een ongunstig effect op de cohesie van het mengsel, omwille van de aantasting van de adhesie tussen bindmiddel en aggregaat.

Watergevoeligheid wordt in ons land gemeten via een indirecte trekproef op kernen. De treksterkte van een reeks proefstukken, geconditioneerd in water, wordt vergeleken met de treksterkte van een reeks niet-geconditioneerde proefstukken. Hoe lager de verhouding van deze treksterktes, hoe gevoeliger het mengsel aan de effecten van water op de cohesie (NBN, 2018a, Bijlage 1).

Watergevoeligheid wordt sterk bepaald door hierna genoemde mengselparameters.

Bindmiddelgehalte

Een hoog bindmiddelgehalte zorgt voor een goede en volledige omhulling van het mineraal aggregaat. Het water vindt dan moeilijker toegang tot het grensvlak tussen bitumen en aggregaat, waardoor de watergevoeligheid beperkt blijft. Tegelijkertijd zorgt het hogere bindmiddelgehalte, bij gelijke VMA, voor een lagere holle ruimte, waardoor het water minder diep doordringt in de bulk van het mengsel.

Holle ruimte

Een lage holle ruimte beperkt de waterindringing en vermindert daardoor de watergevoeligheid.

Dat betekent niet dat de VMA noodzakelijk laag moet zijn. Mengsels met een hoge VMA kunnen toch een lage watergevoeligheid hebben, op voorwaarde dat het bindmiddelgehalte hoog genoeg is. SMA (steenmastiëkasfalt) is hier een voorbeeld van. SMA heeft gewoonlijk een lage watergevoeligheid, dankzij de dikke uniforme mastieffilm rondom de steenkorrels.

Affiniteit bindmiddel/aggregaat

Een goede hechting van het bindmiddel aan het aggregaat verhindert de indringing van water aan het grensvlak en verlaagt daardoor de watergevoeligheid. Deze hechting hangt af van de keuze van het aggregaat. Kalksteen bijvoorbeeld vertoont een zeer goede bindmiddelaffiniteit. De hechting kan desgevallend worden verbeterd door toevoeging van een adhesieverbeteraar (bv. kalkhydraat).

Asfaltgranulaat

Verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat heeft geen systematische impact op de watergevoeligheid. Asfaltgranulaat kan een positieve impact hebben, indien het oud bindmiddel sterk gehecht is aan het oud aggregaat. Ook de aard van de aggregaten spelen daarbij een rol.

Veel hangt echter af van de impact van het asfaltgranulaat op de verdichtbaarheid. Indien het mengsel moeilijker te verdichten is omwille van het asfaltgranulaat, zal de verhoogde holle ruimte leiden tot een hogere watergevoeligheid, maar als het mengsel gemakkelijker te verdichten is, zal dat leiden tot een kleinere holle ruimte en lagere watergevoeligheid.

6.5 Vermoeiingsweerstand

Vermoeiing treedt op door accumulatie van microscheurtjes, onder invloed van herhaalde spanningen. Na een groot aantal belastingherhalingen (dat wil zeggen wielovergangen) resulteert dat in vermoeiingsscheuren. Meestal ontstaan vermoeiingsscheuren aan de onderzijde van de onderlagen, waar de hoogste trekspanningen voorkomen. Dit soort vermoeiingsscheuren leidt tot een drastische afname van de draagkracht van de wegstructuur.

Vermoeiingsweerstand wordt in België in het laboratorium, net zoals de stijfheid, gemeten in een tweepuntsbuigproef op trapeziumvormige proefstukken. Proefstukken worden onderworpen aan een cyclische vervorminggestuurde belasting bij constante temperatuur en frequentie, tot aan falen. De hoogste vervormingsamplitude waarmee men 1 miljoen cycli kan bereiken is een maat voor de vermoeiingsweerstand (NBN, 2018c, Bijlage 1)

Vermoeiing is een zeer complex fenomeen, waardoor de impact van het mengselontwerp erg moeilijk te voorspellen valt. Bovendien is vermoeiing in zekere mate omkeerbaar tijdens periodes van rust, omdat scheuoppervlakken opnieuw kunnen samenvloeien (het *healing effect*). De hiernavolgende mengselparameters hebben wel een aantoonbare impact op het vermoeiingsgedrag.

Bindmiddel

Voor een goede vermoeiingsweerstand moet men gebruik maken van een bindmiddel dat grote herhaalde vervormingen kan weerstaan zonder te scheuren. Polymeergemodificeerde bindmiddelen presteren het best op dat vlak. Een goed hechtvermogen aan het aggregaat heeft ook een positieve impact, omdat dit het ontstaan van microscheurtjes aan de interface afremt.

Bindmiddelgehalte

Een hoger bindmiddelgehalte leidt tot een betere omhulling van de minerale korrels en bijgevolg tot een goede cohesie van het mengsel, waardoor de scheurgevoeligheid afneemt.

Holle ruimte

Gezien microscheuren zich gemakkelijk voortplanten via holten, is een hoge holle ruimte nadelig voor de vermoeiingsweerstand.

Affiniteit bindmiddel/aggregaat

Een goede hechting van het bindmiddel aan het aggregaat verhindert het ontstaan van microscheurtjes aan de interface. Het gebruik van kalksteen of toevoeging van een adhesieverbeteraar kan dus de vermoeiingsweerstand verbeteren.

6.6 Rafelingsweerstand

Rafeling is het fenomeen van steenverlies aan het oppervlak. Dat is zeer ongunstig voor het comfort en de veiligheid van de weggebruiker, het verhoogt de rolweerstand en het evolueert snel verder tot ernstige schadevormen zoals kippennesten.

Rafeling wordt veroorzaakt door lokale schuifkrachten die de uitstekende steenkorrels loswrikken. Het treedt dus vooral op in zones met veel wringend verkeer. Het fenomeen uit zich vooral bij mengsels met een open textuur aan het oppervlak, zoals SMA, zeer open asfalt of sommige types van geluidreducerende lagen.

In het laboratorium wordt rafeling gemeten met een toestel dat de actie van een wringende band op een plaatvormig proefstuk simuleert (European Committee for Standardization, 2018, Bijlage 1).

De volgende ontwerpparameters hebben een impact op de weerstand tegen rafeling.

Bindmiddel

Het bindmiddel moet goed hechten aan het aggregaat en een goede scheurweerstand bieden. Mengsels met polymeergemodificeerde bindmiddelen presteren dus beter op gebied van rafelingsweerstand.

Bindmiddelgehalte

Een goede omhulling van de stenen is nodig voor een goede hechting aan het oppervlak, zodat het bindmiddelgehalte hoog genoeg moet zijn.

Holle ruimte

Een lage holle ruimte is gunstig voor de cohesie en leidt dus tot minder steenverlies aan het oppervlak. Zeer open asfalt is dus een bijzonder kritisch mengsel voor rafeling.

Korrelverdeling

Een hoge zand/steenfractie en een continue korrelverdeling bevorderen de cohesie en leiden tot minder macrottextuur. De stenen zitten beter ingebed tussen fijnere korrels, waardoor het losrukken wordt verhinderd. Asfaltbeton is dus weinig gevoelig voor rafelingschade.

Affiniteit bindmiddel/aggregaat

Een goede hechting van het bindmiddel aan het aggregaat verhindert het loswrikken van stenen.

6.7 Samenvatting

Tabel 6.1 geeft een overzicht van de belangrijkste mengselparameters (materiaal kenmerken en volumetrische kenmerken) en de wijze waarop deze parameters de verschillende prestatiekenmerken positief beïnvloeden. Voor een evenwichtig mengselontwerp kiest men in eerste instantie voor aanpassingen die geen of weinig nadelig effect zullen hebben op de andere prestatiekenmerken, die ook belangrijk kunnen zijn naargelang de toepassing.

Over de impact van het gebruik van asfaltgranulaat kan geen algemene trend worden aangegeven. De impact hangt af van de kwaliteit en de eigenschappen van het asfaltgranulaat, van het mengseltype en van het mengselontwerp zelf, in het bijzonder van de keuze van het nieuwe bindmiddel. Belangrijk is alleszins dat de kenmerken van het homogeen asfaltgranulaat, zoals opgesomd in § 3.5, zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald en meegenomen in het mengselontwerp.

Voor vele toepassingen met zware vereisten biedt het gebruik van polymeergemodificeerde bindmiddelen een oplossing om zowel stabiliteit als duurzaamheid op lange termijn te verbeteren. Dit is te verklaren door hun reologisch gedrag: in vergelijking met gewoon wegenbitumen zijn PmB's bij hogere temperaturen stijver en minder viskeus en bij lagere temperaturen minder stijf en meer elastisch. Zij verbeteren dus zowel de weerstand tegen spoorvorming, die optreedt bij hogere gebruikstemperaturen, als de weerstand tegen scheurvorming, die eerder kritisch is bij lagere temperaturen. Verwerkbaarheid is echter een bijzonder aandachtspunt: mengsels met PmB's zijn doorgaans minder goed verwerkbaar en er dient dus goed gelet te worden op de verwerkingstemperatuur.

Ten slotte moet er ook nog gewezen worden op de mogelijkheid om additieven te gebruiken om bepaalde prestaties te verbeteren. Door het grote aanbod en de vele soorten die vandaag commercieel worden aangeboden, kunnen ze onmogelijk worden opgelijst. De ontwerper moet er zich wel van bewust zijn dat elk additief een positieve invloed kan hebben op een bepaald kenmerk, maar een negatieve invloed op andere kenmerken.

Uit voorgaande paragrafen en de samenvattende tabel blijkt dat men een globaal evenwicht moet zoeken tussen enerzijds stijfheid en weerstand tegen spoorvorming (stabiliteit) en anderzijds weerstand tegen rafeling, vermoeiing, scheurvorming en aantasting door water (langetermijnduurzaamheid). Een aanpassing aan het mengsel voor betere stabiliteit, heeft namelijk vaak een nadelig effect op de duurzaamheid op lange termijn, en vice versa. Toch is het mogelijk om beide zijden in evenwicht te brengen, door een logisch mengselontwerp, gebaseerd op volumetrische principes. Volgend hoofdstuk illustreert dit aan de hand van enkele voorbeelden.

	Verwerkbaarheid/ verdichtbaarheid	Stijfheid	Weerstand tegen spoorvorming	Watergevoeligheid	Weerstand tegen vermoeiing	Weerstand tegen rafeling
Keuze bindmiddel	lage viscositeit bij meng- en verwerkingstemperatuur (hangt samen met gepaste keuze productietemperaturen)	lage $Pen^{(1)}$ hoge G^* (bij overeenkomstige temperatuur en frequentie)	hoge $T_{RSK}^{(1)}$ lage J_{IR} (MSCR test) (in gebied 40-70 °C)	-	positief effect van PmB	positief effect van PmB
Keuze vulstof	lage Rigden holle ruimte	hoge Rigden holle ruimte	hoge Rigden holle ruimte	kalksteenulstof (bij voorkeur)	-	-
Keuze aggregaat	-	-	-	kalksteen of zandsteen	-	-
Hoekigheid aggregaat	laag	-	hoog	-	-	-
Steen/zand- verhouding of discontinuïteit korrelverdeling	laag	-	hoog	-	-	laag
Bindmiddelgehalte	hoog	laag	laag	hoog	hoog	hoog
Holle ruimte	-	-	hoog	laag	laag	laag
Mastiekstijfheid⁽²⁾	laag	hoog	hoog	-	-	-
Affiniteit bindmiddel/ aggregaat	-	-	-	hoog	hoog	hoog

⁽¹⁾ Enkel goede indicator in geval van wegenbitumen

⁽²⁾ Hoge mastiekstijfheid door: stijf bindmiddel, laag bindmiddelgehalte, hoog vulstofgehalte en vulstof met hoge Rigden holle ruimte

Tabel 6.1 – Overzichtstabel van de invloeden van de mengselontwerpparameters en de volumetrie op de mengselprestaties



7. Praktische voorbeelden

In dit hoofdstuk worden enkele voorbeelden gegeven die het ontwerp van bitumineuze mengsels illustreren. Er wordt getoond hoe het ontwerp start met het theoretisch ontwerp (voorbeelden berekend met PradoWeb) en hoe men het mengselontwerp verder bijstuurt, wanneer het mengsel niet voldoet aan de gestelde prestatievereisten.

7.1 Mengselontwerp SMA

SMA of steenmastiakasfalt wordt voorgeschreven als toplaag voor wegen met zwaar verkeer. Een hoge weerstand tegen spoorvorming is dus cruciaal. Als toplaag is ook de weerstand tegen rafeling een belangrijk kenmerk.

Zoals de naam aangeeft zijn steen en mastiek de twee hoofcomponenten van SMA: een hoge hoeveelheid steenslag zorgt voor een stabiel en sterk skelet en een hoge hoeveelheid mastiek voor de cohesie. De mastiek moet daarbij voldoende weerstand bieden aan vervorming.

In dit voorbeeld wordt een mengsel SMA 0/10 ontworpen (zonder asfaltgranulaat).

Keuze van de bestanddelen

- Steenslag: steensoort van zeer hoge kwaliteit, in het bijzonder een hoge slijtvastheid en verbrijzelingsweerstand, gezien de krachten en de slijtage waaraan de stenen worden blootgesteld. In dit voorbeeld wordt gebruik gemaakt van porfier.
- Zand: uitsluitend brekerzand, omwille van de weerstand tegen spoorvorming.
- Vulstof: vulstof met hoge Rigden holle ruimte (45 % in casu), voor een hoge mastiektijfheid.
- Bindmiddel: PmB, voor weerstand tegen spoorvorming en rafeling.
- Additieven: ter illustratie gebruiken we in dit voorbeeld cellulosevezel als afdruiptremmer, om te vermijden dat er segregatie optreedt tussen stenen en mastiek.

Volumetrisch ontwerp

Voor een goede stabiliteit en weerstand tegen spoorvorming wordt gekozen voor een mengsel met steenskelet, dat wil zeggen een aggregaatmengsel met meer dan 70 % stenen. Om een discontinue korrelverdeling te bekomen tussen 2 en 4 mm, wordt een samenstelling gemaakt zonder korrelfractie 2/4 mm en slechts een kleine fractie 4/6,3 mm. De steenfractie bestaat dus overwegend uit stenen met korrelmaat tussen 6,3 en 10 mm.

De zandfractie 0/2 wordt beperkt, om geen verstoring van het steenskelet te veroorzaken.

De hoeveelheid vulstof wordt hoog gekozen, opdat:

- het mastiekvolume hoog genoeg is voor een goede omhulling van de stenen;
- de mastiekstijfheid voldoende hoog is voor de spoorvormingsweerstand.

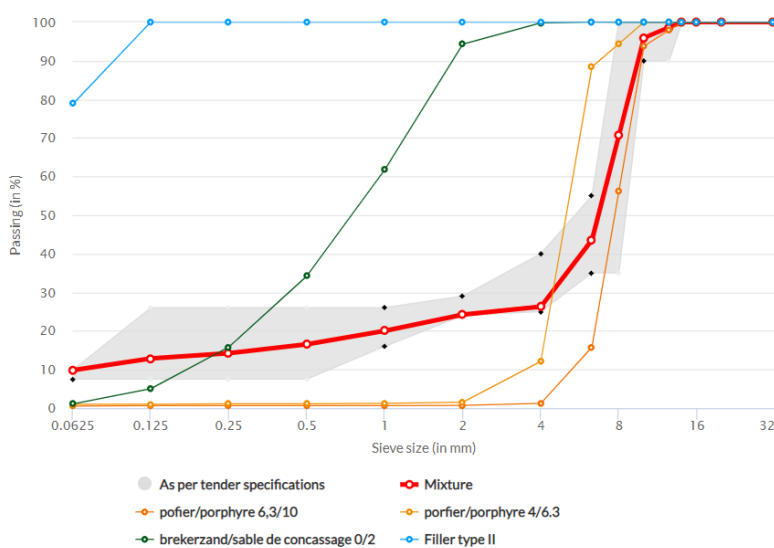
Tabel 7.1 toont de samenstelling van het aggregaat, in massa en in volumepercentages. In dit geval zijn de verschillen tussen beide relatief klein, omdat de volumieke massa's van de aggregaten onderling weinig verschillen.

Soort	Naam	Volumieke massa (Mg/m ³)	Rigden HR (%)	m%	v%
Steenslag	Porfier 6.3/10	2,727		65,5	65,6
Steenslag	Porfier 4/6.3	2,711		10,0	10,1
Zand	Brekerzand 0/2	2,710		12,5	12,6
Aanvoervulstof	Filler type II	2,800	45	12,0	11,7
Totaal		2,732		100,0	100,0

Tabel 7.1 – Samenstelling aggregaat SMA 0/10 (1^{ste} ontwerp)

Figuur 7.1 toont de korrelverdelingen van de bestanddelen en de resulterende korrelverdeling in volumepercentages (rode curve). De grijze zone bakent de grenzen af die door het standaardbestek 250 versie 4.1a zijn opgelegd voor dit mengseltype. De korrelverdeling is discontinu, met een quasi vlak verloop tussen 2 en 4 mm. Door het lage zandgehalte is de doorval door de zeef van 2 mm laag.

Met deze samenstelling van aggregaten berekent PradoWeb een holle ruimte in het mineraal skelet (VMA) van 24,8 %.



VMA

24,76%

Figuur 7.1 – Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstelling in tabel 7.1 (1^{ste} ontwerp)

Omwillen van de cohesie en duurzaamheid wordt gekozen voor een hoog bindmiddelgehalte van 6,6 % in het mengsel. Dit leidt tot de berekende resultaten in de middelste kolom van tabel 7.2. De mastiekstijfheid is erg hoog, door de hoge hoeveelheid vulstof en de keuze voor een vulstof met een hoog verstijvend vermogen. Dat duidt mogelijk op een moeilijke verwerkbaarheid. De holle ruimte is ook vrij hoog en dicht bij de bovengrens voor het standaardbestek. Er is dus een risico dat de holle ruimte in de gyrator niet zal voldoen.

In een tweede ontwerp wordt het bindmiddelgehalte verhoogd tot 7 %. Dat zorgt voor zowel een verlaging van de mastiekstijfheid, en dus een betere verwerkbaarheid, als voor een lagere holle ruimte, zoals blijkt uit de resultaten in tabel 7.2.

Theoretische resultaten PradoWeb	SMA 0/10 1 ^{ste} ontwerp	SMA 0/10 2 ^{de} ontwerp
Bindmiddelgehalte (% in)	6,6	7,0
VMA (%)	24,8	24,8
VFB (%)	57,5	61,3
MSI (°C)	22,8	20,4
SVM (Mg/m ³)	2,201	2,210
MVM (Mg/m ³)	2,459	2,445
Holle ruimte (%)	10,5	9,6

Tabel 7.2 – Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie

Gezien het hoge bindmiddelgehalte worden er 0,3 % vezels toegevoegd, om te kunnen voldoen aan de eis voor maximale afdruipting. Deze eis werd nadien geverifieerd met de proef volgens NBN, 2017a.

De holle ruimte van het tweede ontwerp (mengsel met 7,0 % bindmiddel) werd experimenteel geverifieerd met de gyrator bij 120 gyraties. Het resultaat stemt heel goed overeen met de theoretische schatting en voldoet aan de bestekseis (tabel 7.3).

	Methode	Bestekseisen (SB250 v4.1)	SMA 0/10 2 ^{de} ontwerp
Holle ruimte theoretisch	PradoWeb	/	9,6 %
Holle ruimte gyrator (120 gyr.)	NBN EN 12697-31 (NBN, 2019)	5-11%	9,6 % (± 0,4 %)

Tabel 7.3 – Experimentele verificatie van de holle ruimte

Experimentele verificatie van de prestaties

Met het tweede ontwerp, dat theoretisch goede resultaten geeft en geverifieerd werd met de gyrator, wordt overgegaan op de fase van de prestatieproeven. Tabel 7.4 toont de resultaten. Als toplaag zijn watergevoeligheid, spoorvormingsweerstand en rafelingsweerstand belangrijke kenmerken.

Prestatie	Methode	Gemeten grootte	Bestekseisen (SB250 v4.1a)	SMA 0/10 2 ^{de} ontwerp
Watergevoeligheid	NBN EN 12697-12 (NBN, 2018a)	ITS-R	≥ 80 %	88 %
Spoorvormingsweerstand	NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b)	$P_{3,LD}$	≤ 7,5 % ⁽¹⁾	5,5 %
Rafelingsweerstand	CEN TS 12697-50 (CEN, 2018)	Massaverlies	geen	23 g/m ²

⁽¹⁾ voor Bouwklasse 3

Tabel 7.4 – Experimentele verificatie van de mengselprestaties

Het mengsel voldoet aan de eisen van het standaardbestek voor Bouwklasse 3. Voor SMA 0/10 zijn er geen eisen voor rafeling, omdat rafeling normaal niet optreedt bij SMA met PmB, op voorwaarde dat de goede praktijk wordt gerespecteerd bij productie en aanleg. Het resultaat in deze proef is dan ook zeer goed.

Verdere bijsturing van het ontwerp

Men kan dit mengsel nog verder optimaliseren, zodat het beantwoordt aan de eisen voor Bouwklasse 1-2. Daarvoor moet de spoorvormingsweerstand nog verbeteren (proportionele spoordiepte ≤ 5,0 %).

Tabel 6.1 in het vorige hoofdstuk toont de verschillende opties:

- steen/zand-verhouding: hoger
- discontinuïteit korrelverdeling: hoger
- bindmiddelgehalte: lager
- holle ruimte: hoger
- mastiekstijfheid: hoger (dat wil zeggen hoger vulstofgehalte en/of lager bindmiddelgehalte)

In dit geval is er nog ruimte om:

- de discontinuïteit verder te verhogen, door de fractie 4/6,3 mm te verlagen (en ter compensatie de fractie 6,3/10 te verhogen, zodat de steen/zandverhouding maximaal blijft);
- het bindmiddelgehalte te verlagen, waardoor de holle ruimte verhoogt en bovendien de kostprijs daalt.

Beide wijzigingen zijn doorgevoerd. Tabel 7.5 toont de gewijzigde samenstelling van het aggregaat, met minder steenslag 4/6,3, en meer 6,3/10, waardoor de discontinuïteit licht toeneemt. Men merkt

op in tabel 7.5 dat de aanvoervulstof andere kenmerken heeft als in tabel 7.1. Gezien de vulstof niet meer voorradig was, werd er namelijk gebruik gemaakt van een andere vulstof type II. Deze heeft een lagere Rigden holle ruimte (41 % i.p.v. 45 %), waardoor de mastiekstijfheid nog wat afneemt. Dat is echter nadelig voor de weerstand tegen spoorvorming. Door ook het bindmiddelgehalte te verlagen, blijft de MSI echter voldoende hoog (>18).

Soort	Naam	Volumieke Massa (Mg/m ³)	Rigden HR (%)	SMA 0/10 3 ^{de} ontwerp	
				m%	v%
Steenslag	Porfier 6.3/10	2,727		71,5	71,6
Steenslag	Porfier 4/6.3	2,711		4,0	4,0
Zand	Brekerzand 0/2	2,710		12,5	12,6
Aanvoervulstof	Filler type II	2,780	41	12,0	11,8
Totaal		2,730		100,0	100,0

Tabel 7.5 – Gewijzigde samenstelling van het aggregaat (3^{de} ontwerp)

Het bindmiddelgehalte werd verlaagd met 0,2 % en dit leidt tot de berekende resultaten in tabel 7.6.

Theoretische resultaten PradoWeb	SMA 0/10 3 ^{de} ontwerp
Bindmiddelgehalte (% in)	6,8
VMA (%)	24,2
VFB (%)	61,2
MSI (°C)	18,3
SVM (Mg/m ³)	2,221
MVM (Mg/m ³)	2,451
Holle ruimte (%)	9,4

Tabel 7.6 – Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie

De holle ruimte werd opnieuw experimenteel geverifieerd met de gyratorproef (tabel 7.7). De gemeten holle ruimte is hoger dan de berekende, maar het resultaat voldoet nog aan de bestekseis.

	Methode	Bestekseisen (SB250 v4.1a)	SMA 0/10 3 ^{de} ontwerp
Holle ruimte theoretisch	PradoWeb	/	9,4 %
Holle ruimte gyrator (120 gyr.)	NBN EN 12697-31 (NBN, 2019)	5-11 %	10,9 % (± 0,3 %)

Tabel 7.7 – Experimentele verificatie van de holle ruimte

Experimentele verificatie van de prestaties

Tabel 7.8 toont de resultaten van de prestatieproeven die werden uitgevoerd op het 3^{de} ontwerp mengsel.

	Methode	Gemeten grootte	Bestekseisen (SB250 v4.1a)	SMA 0/10 3 ^{de} ontwerp
Watergevoeligheid	NBN EN 12697-12 (NBN, 2018a)	ITS-R	≥ 80 %	84
Spoorvormingsweerstand	NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b)	$P_{3,LD}$	≤ 5 % (voor BK1-2)	4,5

Tabel 7.8 – Experimentele verificatie van de mengselprestaties

Zoals verwacht leidt deze verdere optimalisatie van de samenstelling tot een betere weerstand tegen spoorvorming, om te voldoen voor Bouwklasse 1-2. De watergevoeligheid voldoet nog steeds, maar is licht verlaagd ten opzichte van het 2^{de} ontwerp. Dit is een logische verandering, gezien het mengsel meer discontinu is geworden, met minder bindmiddel en een hogere holle ruimte. De rafelingsweerstand werd niet meer gemeten, omdat er op dat vlak geen probleem te verwachten is.

Bovenstaand voorbeeld illustreert hoe men een SMA ontwerpt, en uitkomt bij een duurzaam mengsel met een hoge weerstand tegen spoorvorming.

7.2 Mengselontwerp AVS

AVS of Asphalt met Verhoogde Stijfheid wordt voorgeschreven als onderlaag voor wegen met zwaar verkeer. In die toepassing zijn de mengselstijfheid en de weerstand tegen vermoeiing uiterst belangrijk. Ook de weerstand tegen blijvende vorming is belangrijk, omdat spoorvorming zich ook kan doorzetten naar de onderlagen.

AVS is een mengsel dat een heel goed compromis biedt op gebied van duurzaamheid en weerstand tegen spoorvorming. De duurzaamheid wordt bewerkstelligd door een lage holle ruimte. Een hard bindmiddel verleent het mengsel een goede weerstand tegen vervorming en een zeer hoge stijfheid, waardoor het als onderlaag sterk bijdraagt tot de draagkracht van de weg.

In dit voorbeeld wordt een AVS 0/14 ontworpen, zonder en met asfaltgranulaat.

Noot: Het mengsel met asfaltgranulaat werd ontworpen in het kader van onderzoek. Het bevat ongeveer 25 % asfaltgranulaat, wat aanleiding zal geven tot een aandeel oud bindmiddel dat hoger is dan wat momenteel toegelaten is in sommige standaardbestekken (afhankelijk van de homogeniteit van het asfaltgranulaat). Het mengselontwerp is hier ter illustratie weergegeven.

Keuze van de bestanddelen

In dit voorbeeld kiest de ontwerper voor volgende bestanddelen:

- steenslag: kalksteen;
- zand: zowel brekerzand als rond zand, omwille van de verwerkbaarheid;
- vulstof: vulstof type I, omwille van de verwerkbaarheid;
- bindmiddel: hard bitumen, voor weerstand tegen spoorvorming;
- asfaltgranulaat 0/14 mm.

Volumetrisch ontwerp

Omwille van de verwerkbaarheid en de duurzaamheid wordt in dit voorbeeld gekozen voor een mengsel met zandskelet en lage holle ruimte. Daarom wordt er gestreefd naar een lage VMA.

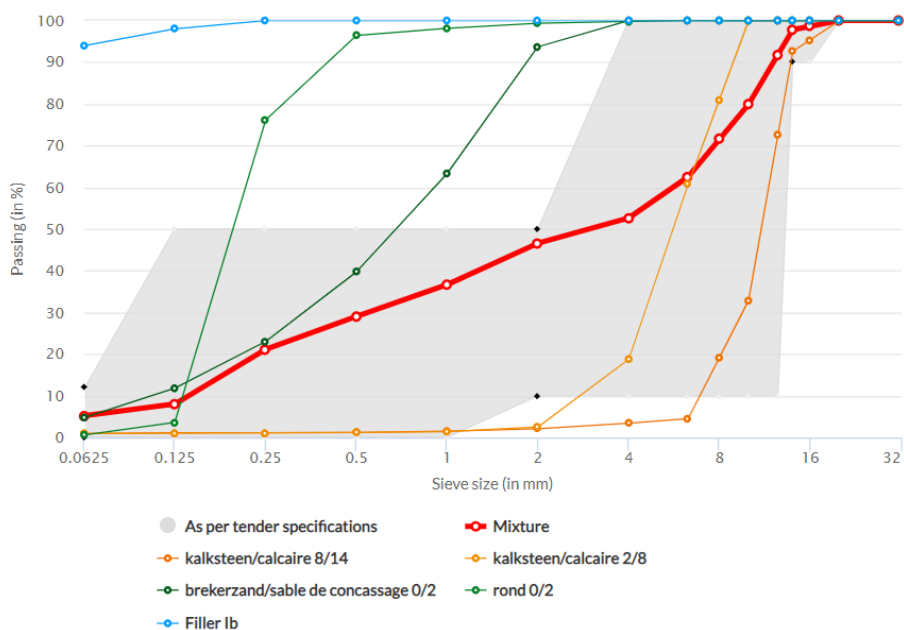
De samenstelling van het aggregaatmengsel met asfaltgranulaat werd automatisch berekend in PradoWeb, door de korrelverdeling van het mengsel zonder asfaltgranulaat in te voeren als streefkorrelverdeling. Beide mengsels hebben dus volumetrisch een identieke korrelverdeling.

De samenstellingen in tabel 7.9 geven zoals gewenst aanleiding tot lage VMA waarden (16,7 % voor het mengsel zonder asfaltgranulaat en 16,2 % voor het mengsel met asfaltgranulaat). De lagere waarde voor het mengsel met asfaltgranulaat is te verklaren door het feit dat het asfaltgranulaat werd ingevoerd met een hoekigheid van 0,5 (dat wil zeggen 50 % hoekige aggregaten). Dat resulteert in een lagere VMA en een lagere holle ruimte, wat wordt bevestigd met de gyratorproef (zie verder voor de gyratorresultaten). Een mogelijke verklaring voor de lagere holle ruimte met asfaltgranulaat is dat de granulaten effectief minder hoekig zijn, door slijtage tijdens het gebruik en het recyclageproces. Mogelijk is ook de vooromhulling van het asfaltgranulaat bevorderlijk voor de verdichting. De systematisch lagere holle ruimte van een mengsel met asfaltgranulaat, in vergelijking

met een equivalent mengsel zonder asfaltgranulaat met identieke volumetrische korrelverdeling, wordt met PradoWeb gewoonlijk goed ingeschat, mits de invoer van een hoekigheid van 0,3 tot 0,5 voor het asfaltgranulaat.

Soort	Naam	Volumieke massa (Mg/m ³)	Rigden HR (%)	AVS 0/14 (zonder AG)		AVS 0/14 (met AG)	
				m%	v%	m%	v%
Steenslag	Kalksteen 8/14	2,844		30,7	29,9	26,0	25,2
Steenslag	Kalksteen 2/8	2,838		23,2	22,7	17,1	16,6
Zand	Brekerzand 0/2	2,710		30,1	30,8	20,8	21,2
Zand	Rond zand	2,661		12,7	13,2	10,3	10,7
Aanvoervulstof	Vulstof Ib	2,683	30,9	3,3	3,4	1,3	1,3
Aggregaatfractie AG	RA 0/14					24,4	24,9
Totaal				100,0	100,0	100,0	100,0

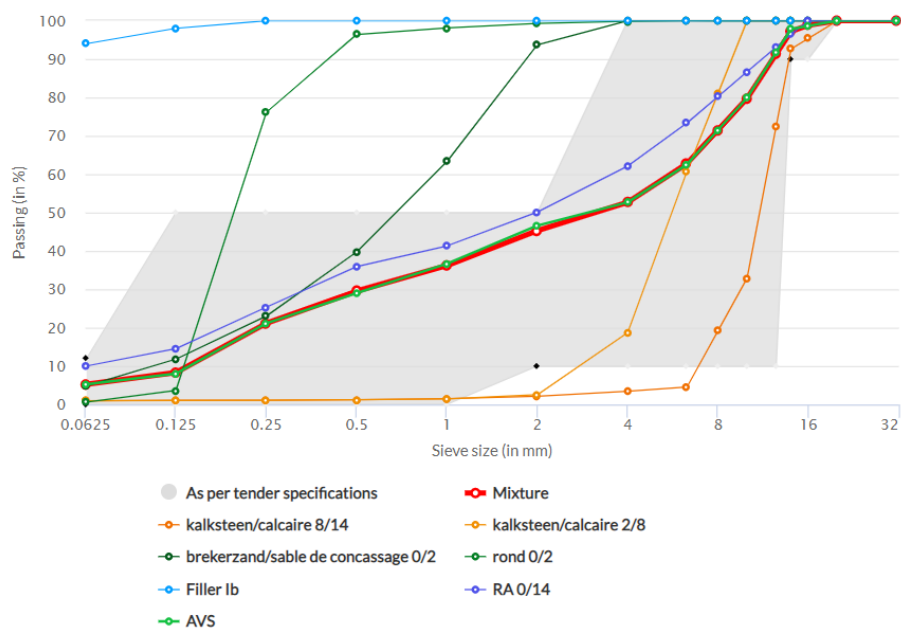
Tabel 7.9 – Samenstelling van het aggregaat voor een mengsel AVS 0/14, met en zonder asfaltgranulaat



VMA

16,74%

Figuur 7.2 – Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstellingen in tabel 7.9 (mengsel zonder asfaltgranulaat)



VMA

16,20%

Figuur 7.3 – Korrelverdelingen bestanddelen en mengsel overeenkomstig de samenstellingen in tabel 7.9 (mengsel met asfaltgranulaat)

De moeilijkere verwerkbaarheid en scheurgevoeligheid, die eigen zijn aan mengsels met een hard bindmiddel, moeten worden opgevangen door een voldoende volume aan bindmiddel. Met een bindmiddelgehalte van 5,0 % in het mengsel vindt men de resultaten in tabel 7.10. De MSI is in dit geval laag, omwille van het lage vulstofgehalte en de keuze voor een vulstof met een relatief lage Rigden holle ruimte (30,9 %). Voor AVS is een lage MSI eerder wenselijk, omdat het bindmiddel hard is. Een hard bindmiddel in combinatie met een hoge MSI zou leiden tot een zeer stijve mastiek en daardoor tot een moeilijk verwerkbaar mengsel.

Berekeningsresultaten PradoWeb	AVS 0/14 (zonder AG)	AVS 0/14 (met AG)
Bindmiddelgehalte (% in)	5,0	5,0
VMA (%)	16,7	16,2
VFB (%)	71,2	73,6
MSI (°C)	7,3	7,5
SVM (Mg/m ³)	2,429	2,432
MVM (Mg/m ³)	2,553	2,541
Holle ruimte (%)	4,8	4,3
Stijfheid @ 15 °C, 10 Hz (MPa)	11742	12536

Tabel 7.10 – Resultaten volgend uit de PradoWeb-studie

In het geval van het mengsel met asfaltgranulaat moet er ook worden gekeken naar de samenstelling en de eigenschappen van het bindmiddel, dat deels bestaat uit nieuw bindmiddel en deels uit het oud bindmiddel in het asfaltgranulaat (tabel 7.11). In dit voorbeeld, waarin het nieuw bindmiddel een hard bindmiddel is, verschillen de empirische kenmerken van nieuw en oud bindmiddel nauwelijks. Het bindmiddelmengsel zal dus ook nagenoeg dezelfde kenmerken hebben. Het aandeel oud bindmiddel, 26,8 %, is hoger is dan wat vandaag toegelaten is (20 %) in sommige standaardbestekken (afhankelijk van de homogeniteit van het asfaltgranulaat).

	%	Pen (in 0,1 mm)	T _{R&K} (in °C)
Nieuw	73,2	13,0	78,4
Oud	26,8	17,0	67,3
Mengsel	100	14,0	75,4

Tabel 7.11 – Samenstelling en eigenschappen van het bindmiddel van het mengsel met asfaltgranulaat

De holle ruimte werd experimenteel geverifieerd met de gyratorproef bij 100 gyraties (tabel 7.12). De gemeten holle ruimte verschilt weinig van de berekende, en het resultaat voldoet aan de bestekseisen.

	Methode	Bestekseisen (SB250 versie 4.1a)	AVS 0/14 (zonder AG)	AVS 0/14 (met AG)
Holle ruimte theoretisch	PradoWeb	/	4,8	4,3
Holle ruimte gyrator (100 gyr.)	NBN EN 12697-31 (NBN, 2019)	2-7 %	4,5	4,1

Tabel 7.12 – Experimentele verificatie van de holle ruimte

Experimentele verificatie van de prestaties

Tabel 7.13 toont de resultaten van de prestatieproeven die werden uitgevoerd op beide mengsels. Hierbij moet worden opgemerkt dat het bindmiddelgehalte werd verhoogd met 0,2 % voor de stijfheids- en vermoeiingsproeven. De eis voor vermoeiing zou waarschijnlijk niet worden gehaald met het lagere bindmiddelgehalte. De verhoging van het bindmiddelgehalte met 0,2 % zou leiden tot een vermoedelijke daling van de holle ruimte met ongeveer 0,5 % (dus nog steeds conform) en de watergevoeligheid zou nog verbeteren.

Prestatie	Methode	Gemeten grootheid	Bestekseisen (SB250 versie 4.1a)	Bindmiddelgehalte (%)	AVS 0/14 (zonder AG)	AVS 0/14 (met AG)
Watergevoeligheid	NBN EN 12697-12 (NBN, 2018a)	ITS-R	$\geq 80 \%$	5,0	94%	94%
Spoorvormingsweerstand	NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b)	$P_{3,LD}$	$\leq 5 \%$ (voor BK1-2)	5,0	2 %	Niet gemeten
Stijfheid (15 °C, 10 Hz)	NBN EN 12697-26 (NBN, 2018c)	E-modulus	$\geq 11\ 000$ MPa	5,2	11860 MPa	Niet gemeten
Vermoeiing	NBN EN 12697-24 (NBN, 2018b)	ϵ_6	$\geq 130 \mu\text{strain}$	5,2	131 μstrain	Niet gemeten

Tabel 7.13 – Experimentele verificatie van de mengselprestaties

De weerstand tegen spoorvorming is zeer goed, waaruit kan worden besloten dat de lage MSI-waarde geen probleem vormt voor de spoorvorming en enkel de verwerkbaarheid zal verbeteren. In principe zou de spoorvormingsproef moeten worden hernomen met het hogere bindmiddelgehalte om aan te tonen dat het mengsel met 5,2 % bindmiddel voldoet aan alle eisen. Theoretisch gezien neemt de spoordiepte immers toe wanneer het bindmiddelgehalte verhoogt.

In het kader van onderzoek werd ditzelfde mengsel nog beproefd met een lager vulstofgehalte, waardoor de MSI nog lager is (6,0 °C) en de spoorgevoeligheid mogelijk zou toenemen. Het resultaat in de wielspoorproef bleef desondanks exact gelijk (2,0 %).

Het mengsel met asfaltgranulaat bevat te veel oud bindmiddel om conform te zijn aan sommige standaardbestekken (afhankelijk van de homogeniteit van het asfaltgranulaat). De hoeveelheid asfaltgranulaat zal dus moeten worden verlaagd met ongeveer 7 %, liefst met behoud van de korrelverdeling in volumepercentages, gezien de holle ruimte van het mengsel zeer gepast was.



8. Bijsturing van het mengselontwerp

In het vorige hoofdstuk werden voorbeelden gegeven die de aanpak van een nieuw mengselontwerp illustreren in het kader van een voorstudie. Er zijn echter nog andere situaties waarin het theoretisch mengselontwerp en het gebruik van PradoWeb bijzonder nuttig zijn. In dit hoofdstuk worden enkele concrete voorbeelden gegeven.

8.1 Herziening van een bestaand mengselontwerp

Een eerste geval doet zich voor wanneer de asfaltproducent al over een mengselontwerp beschikt dat zich heeft bewezen in de praktijk, maar dit moet herzien, bijvoorbeeld omdat:

- de verantwoordingsnota vervalst en sommige materiaalkenmerken zijn gewijzigd;
- een materiaal plots moet worden vervangen omdat het tijdelijk of permanent niet beschikbaar is;
- de asfaltproducent een ander materiaal wil gebruiken, bv. omdat het goedkoper of gemakkelijker aan te voeren is.

De wijzigingen van de materiaalkenmerken vragen dan doorgaans om een aanpassing van het mengselontwerp.

De meest efficiënte werkwijze om het mengsel te herzien, begint met de terugkeer naar het theoretisch mengselontwerp. Met PradoWeb gebeurt dit snel: het volstaat om de gewijzigde materialen in te voeren en te vervangen in de bestaande mengselstudie, en PradoWeb leert onmiddellijk wat de impact is van de wijziging op de korrelverdeling, de volumetrie, de mastiekstijfheid en de mengselstijfheid. Indien één of meer berekende resultaten te veel zijn gewijzigd, waardoor er bepaalde risico's zijn, zoals een holle ruimte die mogelijk niet meer zal voldoen of een mastiekstijfheid die duidt op moeilijkere verwerkbaarheid, kan men het mengselontwerp gericht bijsturen. Doorgaans wil men dat de volumetrie van het mengsel niet of slechts weinig verandert ten opzichte van het vroegere mengsel, met andere woorden de korrelverdeling in volumedelen blijft dezelfde. Ook dat is snel gebeurd: in PradoWeb voert men de vroegere korrelverdeling in als streefkorrelverdeling, en de aggregaatsamenstelling wordt automatisch herberekend, zodanig dat de gewenste streefkorrelverdeling wordt gerealiseerd.

Zoals in het geval van een nieuw mengselontwerp, wordt de experimentele fase pas aangevat wanneer de theoretische studie voldoet.

8.2 Inschatting van de impact van variaties tijdens de productie

Een tweede geval waarbij het theoretisch mengselontwerp van nut is, zijn situaties waarbij in de asfaltcentrale de productie afwijkingen vertoont (qua bindmiddelgehalte en/of korrelverdeling) ten opzichte van het goedgekeurd mengsel. Dit kan het gevolg zijn van:

- weegfouten, waardoor de afgewogen hoeveelheden niet overeenstemmen met de instellingen;
- de variabiliteit van de samenstelling en kenmerken van de bestanddelen.

Afwijkingen qua bindmiddelgehalte en korrelverdeling zullen zo snel mogelijk worden gecorrigeerd, door de gewichtsdoseringen van de bestanddelen in de centrale bij te sturen. Wanneer met deze bijstellingen de afwijkingen op bindmiddelgehalte en korrelverdeling binnen de toleranties blijven, zullen er vermoedelijk geen grote afwijkingen zijn qua volumetrie. Toch kan het bijsturen van doseringen, in combinatie met de variabiliteit van de kenmerken van sommige bestanddelen, bepaalde risico's inhouden.

Met PradoWeb kan de impact van een gewijzigde samenstelling worden beoordeeld of kunnen alternatieve opties voor het bijsturen snel worden vergeleken, en kunnen de verschillende risico's ervan worden ingeschat.

Als voorbeeld wordt het mengsel uit hoofdstuk 5 hernomen: type APO-A, met asfaltgranulaat (40 % aandeel in het aggregaat en 46 % aandeel in het bindmiddel).

Indien het bindmiddelgehalte in het asfaltgranulaat in de loop van de productie zou afnemen van 5,4 % naar 4,6 % (daling van 0,8 %), zou dat resulteren in een daling van het totale bindmiddelgehalte van 4,70 % naar 4,37 %. Die afname is groter dan de maximaal toegelaten afwijking ten opzichte van het goedgekeurd mengsel (0,3 %), en het resultaat is lager dan het minimale bindmiddelgehalte van 4,60 % (4,56 % na correctie op basis van de volumieke massa). De asfaltproducent is dus genoodzaakt om de samenstelling tijdens de productie bij te sturen.

Om het bindmiddelgehalte te verhogen zijn er twee opties (of een combinatie van beide opties):

1. verhoging van het gehalte aan nieuw bindmiddel;
2. verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat.

Een korte theoretische studie aan de hand van PradoWeb laat toe om de impact van elke optie in te schatten.

Optie 1: Verhoging van het gehalte aan nieuw bindmiddel

Tijdens de asfaltproductie mag het percentage aan nieuw bindmiddel met maximaal 0,3 % worden bijgestuurd. Dat verandert niets aan de samenstelling van het aggregaat, de korrelverdeling en de VMA. Er zal enkel een impact zijn op het niveau van het bindmiddel (hoeveelheid, aandeel oud bindmiddel en kenmerken bindmiddelmengsel).

Tabellen 8.1 en 8.2 tonen de impact van een verhoging van 0,3 % van het gehalte aan nieuw bindmiddel op de hoeveelheid bindmiddel, de samenstelling en de kenmerken van het bindmiddelmengsel. Hierbij wordt het volgende vastgesteld:

- Het totale bindmiddelgehalte bedraagt 4,66 %. Er is dus nog een kleine afwijking van 0,04 % ten opzichte van het goedgekeurd mengsel. Dat is aanvaardbaar, want het resultaat is boven het minimale bindmiddelgehalte (4,56 %, rekening houdend met de volumieke massa van het aggregaat).
- De samenstelling van het bindmiddelmengsel wijzigt en het bindmiddelmengsel wordt iets zachter (pen gaat van 35,0 naar 38,6.10⁻¹ mm).

	goedgekeurd mengsel		afwijkend mengsel		bijgestuurd mengsel (optie 1)	
	m% in mengsel	m% in bitumen	m% in mengsel	m% in bitumen	m% in mengsel	m% in bitumen
nieuw	2,54 %	54,1 %	2,54 %	58,1 %	2,83 %	60,8 %
oud	2,16 %	45,9 %	1,83 %	41,9 %	1,83 %	39,2 %
Totaal	4,70 %	100,0 %	4,37 %	100,0 %	4,66 %	100,0 %

Tabel 8.1 – Impact van bijsturing (optie 1) op bindmiddelgehalte en bindmiddelsamenstelling

	nieuw bitumen	oud bitumen	mengbitumen		
			goedgekeurd mengsel	afwijkend mengsel	bijsturing (optie 1)
Pen (in 0,1 mm)	68,0	16,0	35,0	37,1	38,6
T _{R&K} (in °C)	47,3	70,0	57,7	56,8	56,2

Tabel 8.2 – Impact van bijsturing (optie 1) op de empirische kenmerken van het bindmiddelmengsel

Tabel 8.3 toont dat de volumetrie en de MSI-waarde van het bijgestuurde mengsel nauwelijks verschillen van het goedgekeurde mengsel.

	goedgekeurd mengsel	afwijkend mengsel	bijsturing (optie 1)
VMA (%)	17,3	idem	idem
v _{agg} (%)	82,7	idem	idem
v _b (%)	10,7	9,9	10,6
HR (%)	6,6	7,4	6,7
VFB (%)	61,6	57,1	61,1
Rigden HR (%)	35,3	idem	idem
Percentage vulstof afkomstig van AG (%)	68,0	idem	idem
MSI (°C)	14,4	16,2	14,6

Tabel 8.3 – Impact van bijsturing (optie 1) op volumetrie, vulstof en MSI

Optie 2: Verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat

Deze wijziging heeft wel een impact op de aggregaatsamenstelling. Gezien er toleranties zijn op de maximale afwijking van de korrelverdeling, moet de samenstelling zodanig worden bijgestuurd dat de korrelverdeling minimaal afwijkt ten opzichte van het goedgekeurde mengsel. PradoWeb berekent automatisch de best benaderende samenstelling, wanneer de korrelverdeling van het goedgekeurde mengsel (in volumepercentages) wordt ingevoerd als streefkorrelverdeling. In deze berekening werd de hoeveelheid aggregaat afkomstig van het asfaltgranulaat vastgelegd op 47,5 % (in volumepercentage van het aggregaatmengsel), dat wil zeggen een verhoging met 7,5 % ten opzichte van het goedgekeurde mengsel. Het resultaat van deze bijsturing van de samenstelling is weergegeven in tabel 8.4.

Tabel 8.5 toont de impact van deze bijsturing op de korrelverdeling. Zoals verwacht zijn de afwijkingen ten opzichte van het goedgekeurde mengsel zeer beperkt. De afwijking is het grootst op de zeef van 2 mm, maar dat valt nog ruim binnen de tolerantie van ± 3 % (tolerantie voor een gemiddelde van 10 resultaten) (COPRO, 2014, p. 29).

	goedgekeurd mengsel (in v%)	bijsturing (optie 2) (in v%)
kalksteen 14/20	2,2	2,3
kalksteen 6,3/14	32,6	31,3
brekerzand 0/2	23,6	18,5
vulstof lb	1,6	0,5
RA 0/14	40,0	47,5
Totaal	100	100

Tabel 8.4 – Impact van de bijsturing (optie 2) op de samenstelling van het aggregaat in volumepercentages

Zeeffmaat (mm)	goedgekeurd mengsel	bijsturing (optie 2)
	doorval (in v%)	doorval (in v%)
31,5	100,0	100,0
20	99,9	99,9
14	95,0	95,0
10	81,1	81,4
6,3	66,0	66,0
4	53,4	52,4
2	41,8	40,5
1	28,3	28,1
0,5	20,5	21,1
0,25	15,4	16,1
0,125	9,0	9,0
0,063	7,0	6,8

Tabel 8.5 – Impact van de bijsturing (optie 2) op de korrelverdeling

De verhoging van de hoeveelheid asfaltgranulaat leidt tot een bindmiddelgehalte van 4,71 % in het mengsel. Tabel 8.6 toont het resultaat van de bindmiddelsamenstelling en tabel 8.7 de voorspelde empirische kenmerken. Met deze optie zijn er geen significante verschillen ten opzichte van het goedgekeurd mengsel, omdat de verlaging van het gehalte oud bindmiddel in het asfaltgranulaat wordt gecompenseerd.

	goedgekeurd mengsel		afwijkend mengsel		bijgestuurd mengsel (optie 2)	
	m% in mengsel	m% in bitumen	m% in mengsel	m% in bitumen	m% in mengsel	m% in bitumen
nieuw	2,54 %	54,1 %	2,54 %	58,1 %	2,54 %	54,0 %
oud	2,16 %	45,9 %	1,83 %	41,9 %	2,17 %	46,0 %
Totaal	4,70 %	100,0 %	4,37 %	100,0 %	4,71 %	100,0 %

Tabel 8.6 – Impact van bijsturing (optie 2) op bindmiddelgehalte en bindmiddelsamenstelling

	nieuw bitumen	oud bitumen	mengbitumen		
			goedgekeurd mengsel	afwijkend mengsel	bijsturing (optie 2)
Pen (in 0,1 mm)	68,0	16,0	35,0	37,1	34,9
T_{R&K} (in °C)	47,3	70,0	57,7	56,8	57,7

Tabel 8.7 – Impact van bijsturing (optie 2) op de empirische kenmerken van het bindmiddelmengsel

Tabel 8.8 toont ten slotte de impact op de volumetrie en de MSI-waarde. Er zijn opnieuw geen grote verschillen met het goedgekeurde mengsel. De veranderingen op gebied van volumetrie zijn klein, een logisch gevolg van de correcte bijsturing van de samenstelling met het oog op het behoud van de korrelverdeling. De vulstofsamenstelling is gewijzigd, maar de impact op de Rigden holle ruimte is vrij beperkt, omdat de Rigden holle ruimte van de vulstoffractie van het asfaltgranulaat weinig verschilt van deze van aanvoervulstof.

	goedgekeurd mengsel	afwijkend mengsel	bijsturing (optie 2)
VMA (%)	17,3	idem	17,2
v_{agg} (%)	82,7	idem	82,8
v_b (%)	10,7	9,9	10,7
HR (%)	6,6	7,4	6,5
VFB (%)	61,6	57,1	62,4
Rigden HR (%)	35,3	idem	36,2
Percentage vulstof afkomstig van AG (%)	68,0	idem	83,6
MSI (°C)	14,4	16,2	14,4

Tabel 8.8 – Impact van bijsturing (optie 2) op volumetrie, vulstof en MSI

Uit deze kleine theoretische studie kan men besluiten dat beide opties (of een combinatie van beide) aanvaardbaar zijn. De tweede optie, verhoging van het aandeel asfaltgranulaat, lijkt de meest interessante omwille van het hoger hergebruik en het lager verbruik aan nieuw bitumen. De asfaltproducent moet echter rekening houden met bepaalde risico's, verbonden aan de variabiliteit van het asfaltgranulaat. Stel dat de vulstoffractie van het asfaltgranulaat zou toenemen tijdens de productie, dan zal dat een impact hebben op de doorval door de vulstofzeef van 0,063 mm. Bijsturen aan de hand van de aanvoervulstof is nauwelijks nog mogelijk, want deze hoeveelheid is al zeer klein. De doorval door de zeef van 0,063 mm mag in principe nog toenemen tot maximaal 8,5 % (1,5 % afwijking ten opzichte van het goedgekeurde mengsel), doch dat zal leiden tot een verhoogde mastiekstijfheid en mogelijk een moeilijker verwerkbaarheid. Bovendien is de Rigden holle ruimte van de vulstoffractie ook onderhevig aan schommelingen. Een toename ervan zou op zich ook leiden tot een verhoging van de mastiekstijfheid.

De voorgaande voorbeelden illustreren dat een asfaltproducent via het theoretisch mengselontwerp kan inschatten wat allerlei variaties in het asfaltgranulaat betekenen voor de volumetrische kenmerken en de mastiekstijfheid. Zo kunnen risico's op falen in de praktijk worden verminderd.

8.3 Verbetering van de verwerkbaarheid bij de uitvoering

Een derde geval waarbij de inzet van het theoretisch mengselontwerp zeer nuttig kan zijn, is wanneer tijdens de aanleg op de bouwplaats blijkt dat het mengsel moeilijk verwerkbaar of te verwerkbaar is.

De meest voorkomende oorzaken kunnen zijn:

- variaties in het vulstofgehalte en/of vulstofeigenschappen, meest voorkomend in mengsels met asfaltgranulaat en/of een hoog aandeel aan teruggewonnen vulstof.
- variaties in de consistentie van het bindmiddel of de bindmiddelsamenstelling, ook meest voorkomend in mengsels met asfaltgranulaat.

In geval van een moeilijke verwerkbaarheid kan men nog volgende bijstellingen doen, binnen de toegelaten toleranties:

- verhoging bindmiddelgehalte;
- verlaging vulstofgehalte;
- verlaging van de verhouding brekerzand/rond zand;
- verlaging van de verhouding steenfractie/zandfractie.

Nazicht van de theoretische studie in PradoWeb laat toe om beter in te schatten wat de beste optie is:

- Indien de MSI-waarde hoog is, dan is een verhoging van het bindmiddelgehalte en/of een verlaging van het vulstofgehalte het meest aangewezen, omdat deze wijzigingen leiden tot een verlaging van de MSI.
- Indien de MSI eerder laag is, dan ligt het probleem vermoedelijk niet bij de mastiekstijfheid en zijn de twee laatste opties aangewezen. Een verdere verlaging van de MSI is dan niet gewenst, omdat hierdoor de gevoeligheid aan spoorvorming zal toenemen.

Tegelijkertijd kan de asfaltproducent hieruit leren. Als de bijsturing succesvol is en resulteert in een goede verwerkbaarheid, kan daaruit worden afgeleid wat een goede richtwaarde is voor de MSI van het type mengsel dat werd aangelegd. Deze kennis kan worden benut in toekomstige mengselontwerpen, zodat de asfaltproducent meer vat heeft op de verwerkbaarheid van de geproduceerde mengsels.



Literatuur

- COPRO. (2014). Technische voorschriften voor asfaltmengsels (Technische Voorschriften COPRO No. PTV 864, versie 2.0). <https://www.copro.eu/nl/ptv-864>
- Francken, L. (1991). Granulométrie et formulation. *Bituminfo*(60), 3–21.
- Francken, L., & Moraux, C. (1985). Invloed van de vulstoffen op de consistentiekenmerken van bitumineuze mastieken. *Bituminfo*(49), pp. 7–18.
- Francken, L., & Vanelstraete, A. (1993, June 16-18). New developments in analytical asphalt mix design. In *Summaries and papers of the 5th Eurobitume congress. Volume 1B: Session 3; Session 4, Stockholm, Sweden* (pp. 502–507). European Bitumen Association (Eurobitume).
- Francken, L., & Vanelstraete, A. (1996). Complex moduli of bituminous binders and mixtures: Interpretation and evaluation. In *6th Eurasphalte & Eurobitume Congress 1996*.
- Heleven, L. J. (1985, September 11-13). A geometrical approach to the mix-design of bituminous pavements. In *Bitumen, flexible and durable: 3rd Eurobitume symposium, The Hague, The Netherlands. Volume I: Summaries and papers*.
- Hunter, R. N., Self, A., & Read, J. (2015). *The Shell Bitumen handbook* (Sixth edition). ICE Publishing.
- Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw. (2002). *Handleiding voor de bereiding van bitumineuze mengsels* (OCW Aanbevelingen No. A72/02).
- Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw. (2018). *Handleiding voor de verwerking van bitumineuze mengsels* (OCW Aanbevelingen No. A 96).
- Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw. (2020). *Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp of onderhoud van wegconstructies* (OCW Aanbevelingen No. A 102).
- Vansteenkiste, S. & Piérard, N. (2014). *Beoordeling van het effectieve gehalte aan holle ruimte in een bitumineus mengsel met staalslak* (LD-slak, elo-slak, roestvaststaalslak, enz.) (OCW Leaflet No. N93). Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw (OCW).
- West, R. C., Watson, D. E., Turner, P. A., & Casola, J. R. (2010). *Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt* (NCHRP Report No. 648). Transportation Research Board (TRB). <https://www.trb.org/Publications/Blurbs/163348.aspx>

Standaardbestekken

- Brussel Mobiliteit. (2016). TB 2015: Typebestek betreffende wegeniswerken in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. <https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/tb2015.pdf>
- Service Public de Wallonie, Mobilité & Infrastructures. (2021). CCT Qualiroutes: Cahier des charges-type (Geconsolideerde versie 2021 [en de daaropvolgende aanpassingen]). http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index_cctquali.html
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer. (2021). Standaardbestek 250 voor de wegenbouw (versie 4.1a). <https://wegenverkeer.be/zakelijk>

Normen

- Bureau voor Normalisatie. (2001). *Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 6: Beoordeling van oppervlakte-eigenschappen: Stroomcoëfficiënt van toeslagmaterialen* (NBN EN 933-6). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-933-6-2001_5912/
- Bureau voor Normalisatie. (2007). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Bepaling van het verwerkingspunt: Ring- en kogelmethode* (NBN EN 1427). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1427-2007_19454/
- Bureau voor Normalisatie. (2008). *Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische fysische eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 4: Bepaling van de holle ruimten in droge verdichte vulstof* (NBN EN 1097-4). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1097-4-2008_22602/
- Bureau voor Normalisatie. (2009a). *Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 8: Bepaling van de polijstwaarde* (NBN EN 1097-8). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1097-8-2009_11091/
- Bureau voor Normalisatie. (2009b). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Eisen voor wegenbitumen* (NBN EN 12591). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12591-2009_19592/
- Bureau voor Normalisatie. (2010). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Specificaties voor met polymeren gemodificeerd bitumen* (NBN EN 14023). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-14023-2010_587/
- Bureau voor Normalisatie. (2011). *Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 1: Bepaling van de weerstand tegen afslijting (micro-Deval)* (NBN EN 1097-1). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1097-1-2011_34150/
- Bureau voor Normalisatie. (2012a). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Bepaling van de complexe afschuifmodulus en fasehoek: Dynamische afschuif rheometer (DSR)* (NBN EN 14770). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-14770-2012_38018/
- Bureau voor Normalisatie. (2012b). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Bepaling van de buigkruipstijfheid: Buigproef rheometer (BBR)* (NBN EN 14771). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-14771-2012_21196/

- Bureau voor Normalisatie. (2013a). *Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 6: Bepaling van de deeltjesdichtheid en de wateropname* (NBN EN 1097-6). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1097-6-2013_15830/
- Bureau voor Normalisatie. (2013b). *Beproevingen voor minerale vulstof in bitumineuze mengsels. Deel 1: Deltaring- en kogelproef* (NBN EN 13179-1). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-13179-1-2013_35925/
- Bureau voor Normalisatie. (2015a). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Bepaling van de naaldpenetratie* (NBN EN 1426). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1426-2015_38723/
- Bureau voor Normalisatie. (2015b). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Specificaties voor speciaal wegenbitumen. Deel 1: Hard wegenbitumen* (NBN EN 13924-1). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-13924-1-2015_31705/
- Bureau voor Normalisatie. (2016a). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 25: Cyclische drukproef* (NBN EN 12697-25). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-25-2016_17105/
- Bureau voor Normalisatie. (2016b). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 35: Mengen van bitumineuze materialen in het laboratorium* (NBN EN 12697-35). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-35-2016_27190/
- Bureau voor Normalisatie. (2016c). *Bitumen en bitumineuze bindmiddelen: Multiple stress creep and recovery test (MSCRT)*(NBN EN 16659). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-16659-2016_39476/
- Bureau voor Normalisatie. (2016-2019). *Bitumineuze mengsels: Materiaalspecificaties* (NBN EN 13108-[1-31]). <https://www.nbn.be/shop/nl/zoeken/?src=t&k=13108>
- Bureau voor Normalisatie. (2017a). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 18: Afgedropen bindmiddel* (NBN EN 12697-18). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-18-2017_27115/
- Bureau voor Normalisatie. (2017b). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 23: Bepaling van de indirecte treksterkte van bitumineuze monsters* (NBN EN 12697-23). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-23-2017_33203/
- Bureau voor Normalisatie. (2018a). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 12: Bepaling van de watergevoeligheid van bitumineuze monsters* (NBN EN 12697-12). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-12-2018_40451/
- Bureau voor Normalisatie. (2018b). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 24: Weerstand tegen vermoeidheid* (NBN EN 12697-24). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-24-2018_40525/
- Bureau voor Normalisatie. (2018c). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 26: Stijfheid* (NBN EN 12697-26). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-26-2018_38281/
- Bureau voor Normalisatie. (2019). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 31: Proefstukken verdicht met een gyratorverdichter* (NBN EN 12697-31). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-31-2019_29351/

Bureau voor Normalisatie. (2020a). *Beproevingmethoden voor de mechanische en fysische eigenschappen van aggregaten. Deel 2: Methoden voor het bepalen van de weerstand tegen verbrijzeling* (NBN EN 1097-2). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-1097-2-2020_21230/

Bureau voor Normalisatie. (2020b). *Bitumineuze mengsels: Beproevingmethoden. Deel 22: Wielspoorproef* (NBN EN 12697-22). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-12697-22-2020_26010/

European Committee for Standardization. (2018). *Bituminous mixtures: Test methods. Part 50: Resistance to scuffing* (CEN/TS 12697-50). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/cen-ts-12697-50-2018_33881/

Bijlagen

Bijlage 1: Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze mengsels

Bijlage 2: Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze bindmiddelen

Bijlage 3: Mengselontwerp in geval van poreuze aggregaten

Afkortingenlijst

AB	Asfaltbeton
AC	Asphalt concrete
AG	Asfaltgranulaat
AVS	Asfaltbeton met verhoogde stijfheid (= EME in FR)
BBR	Bending Beam Rheometer
CCT	Cahier des charges type
DSR	Dynamic Shear Rheometer
PA	Porous Asphalt (= ED in FR, ZOA in NL)
PmB	Polymeergemodificeerd bitumen
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery
MSI	Mastic Stiffness Indicator
SB	Standaardbestek
SMA	Steenmastiekasfalt
VFB	Voids Filled with Binder
VMA	Voids in the Mineral Aggregate
ZOA	Zeer open asfalt (= ED in FR, PA in GB)

Symbolenlijst

ρ	Volumieke massa (of densiteit)
$\text{voids}_{\text{Rigden}}$	Holle ruimte vulstof volgens Rigden
pen	Naaldpenetratie
$T_{\text{R\&K}}$	Verwekingspunt Ring & Kogel methode
HR	Percentage holle ruimte
V_{agg}	Volumepercentage aggregaat
V_f	Volumepercentage vulstof
V_b	Volumepercentage bindmiddel



Bijlage 1

Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze mengsels

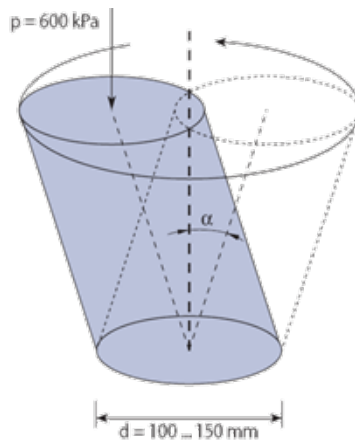
1. Gyrator

De verdichtbaarheid van een asfaltmengsel kan worden beoordeeld met behulp van een gyratorverdichter volgens de Europese norm EN 12697-31 (NBN, 2019). Met dit apparaat worden warme asfaltmengsels verdicht in een cilindrische mal (figuur A1.1), onder invloed van een knedende krachtwerking. De krachtwerking wordt teweeggebracht door een constante verticale kracht, in combinatie met een omwentelende beweging van de as van de gyrator. De as beschrijft daarbij een kegeloppervlak met een kleine, vast ingestelde “gyratorhoek” (α), zoals geïllustreerd in figuur A1.2. De top- en bodemplaat van de mal zijn beweegbaar ten opzichte van de mantel van de mal en blijven steeds horizontaal, waardoor er een oscillerende afschuifspanning wordt opgewekt. Tijdens de proef wordt de hoogte van het proefstuk continu gemeten. Hieruit wordt het verloop van de schijnbare volumieke massa als functie van het aantal gyraties afgeleid. Wanneer ook de maximale volumieke massa van het mengsel is gekend, kan de holle ruimte worden bepaald als functie van het verdichtingsniveau, dat evenredig is met het aantal gyraties.

De gyratorproef laat toe de impact van de bestanddelen en hun samenstelling op de holle ruimte te beoordelen en is dus een belangrijke eerste proef om de volumetrie van het mengsel te verifiëren.



Figuur A1.1 – Gyratoroestel en mal en proefstuk na verdichting

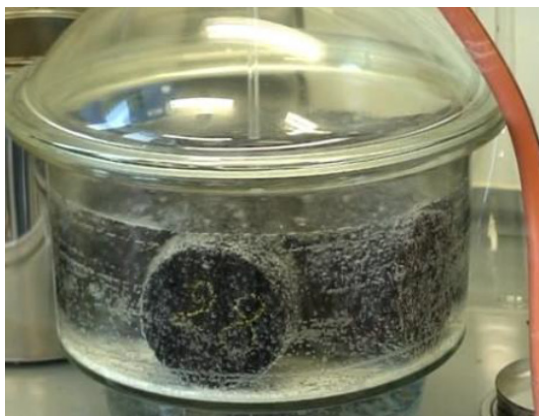


Figuur A1.2 – *Beweging van de mal tijdens de verdichting*

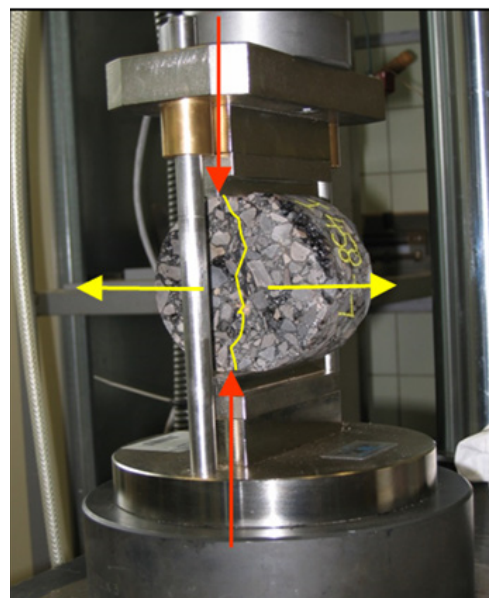
2. Watergevoeligheid (ITS-R)

Langdurige blootstelling aan water leidt tot een afname van de sterkte van bitumineuze mengsels. De bepaling van de sterkte van in water geconditioneerde proefstukken, in verhouding tot de sterkte van proefstukken die niet onderworpen zijn aan waterconditionering, laat dus toe om de watergevoeligheid van een mengsel te beoordelen. De Europese norm EN 12697-12 voor de bepaling van de watergevoeligheid van bitumineuze proefstukken (NBN, 2018a), reikt een standaardmethode aan voor de waterconditionering en de bepaling van de watergevoeligheid. In combinatie met de Europese norm voor de bepaling van de indirecte treksterkte (spleetsterkte) van bitumineuze proefstukken (NBN, 2017b) (figuur A1.3), beschikken we over een proefmethode voor de bepaling van de watergevoeligheid van een bitumineus mengsel. Hoe kleiner de verhouding van de indirecte treksterkte van geconditioneerde proefstukken, relatief ten opzichte van de indirecte treksterkte van niet geconditioneerde proefstukken (*Indirect Tensile Strength Ratio* – ITS-R (in %)), hoe hoger de watergevoeligheid van het mengsel.

De methode biedt aldus de mogelijkheid om te peilen naar de impact van materiaalkeuzen en/of mengselontwerp op de watergevoeligheid.



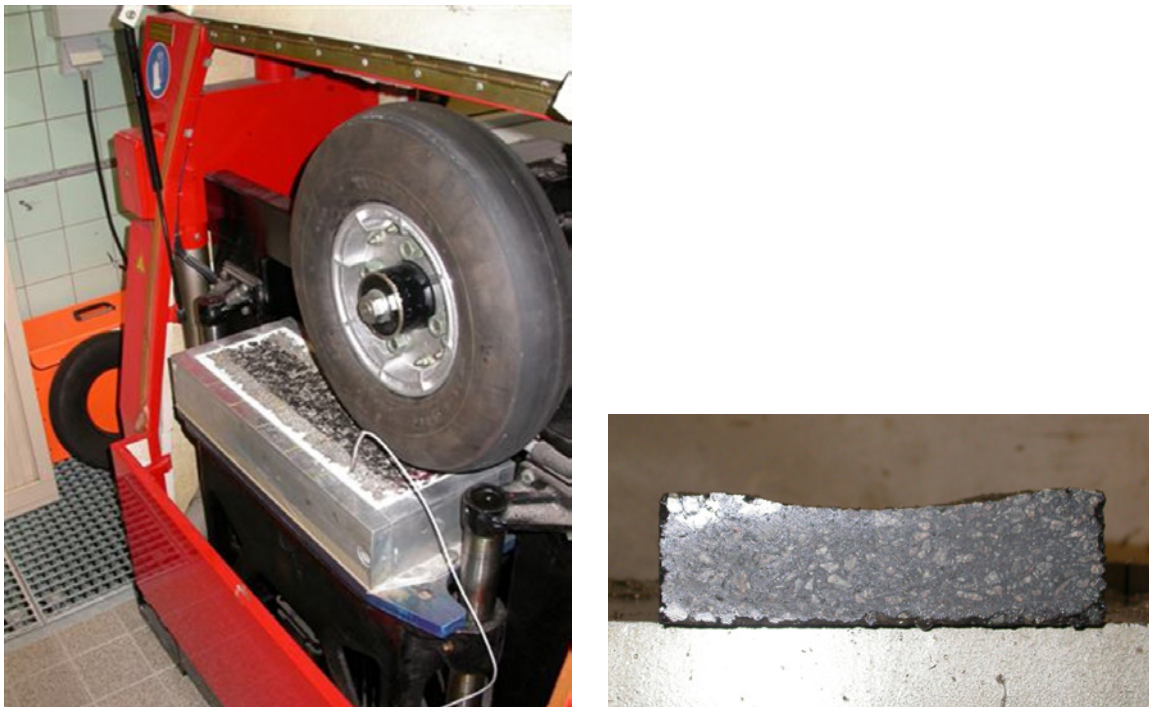
Figuur A1.3 – *Waterconditionering en meting van de indirecte treksterkte van bitumineuze proefstukken*



3. Weerstand tegen spoorvorming (*large size device*)

De weerstand tegen spoorvorming wordt bepaald met de wielspoorproef volgens de Europese norm NBN EN 12697-22 (NBN, 2020b). In België wordt gebruikgemaakt van de zogenaamde *large size device*, een toestel waarin twee plaatvormige proefstukken worden onderworpen aan een verticale aslast van 5 kN op een band die met een frequentie van 1 Hz een rechte lijnige heen en-weerbeweging maakt (figuur A1.4). De verticale vervorming wordt na een vastgelegd aantal belastingcycli op welbepaalde plaatsen in het lengte- en dwarsprofiel gemeten (figuur A1.5). Hieruit wordt het verloop van de gemiddelde spoordiepte met het aantal wielovergangen bepaald. De proef wordt in België uitgevoerd bij een standaardtemperatuur van 50 °C.

De wielspoorproef biedt de mogelijkheid om te peilen naar de impact van materiaalkeuzen en/of mengselontwerp op de weerstand tegen spoorvorming.



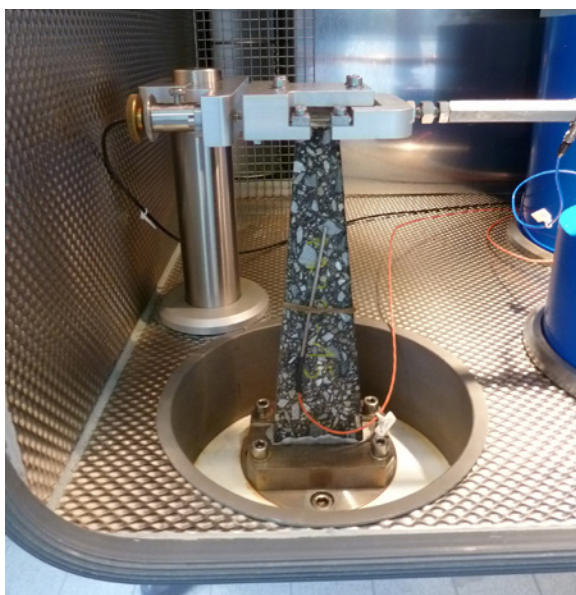
Figuur A1.4 – Verkeerssimulator en meting van de spoordiepte

4. Stijfheid (tweepunts)

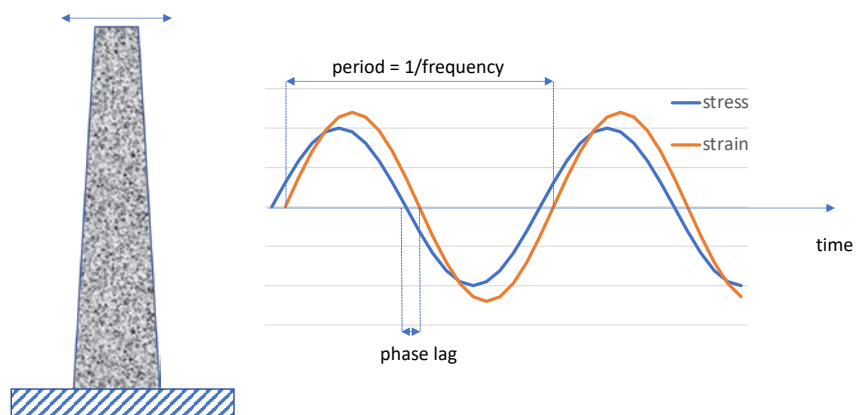
De Europese norm NBN EN 12697-26 (NBN, 2018c) beschrijft verschillende proefopstellingen om de stijfheid van bitumineuze mengsels te bepalen bij verschillende temperaturen en met verschillende frequenties. In België wordt gebruik gemaakt van de tweepuntsbuigproef op trapezoïdale proefstukken. De methode bestaat erin een trapezoïdaal proefstuk, dat aan de brede basis is ingeklemd, op wisselende sinusoidale buiging te belasten (figuur A1.5). De belasting blijft in het lineaire domein, dit is het domein waarin het verband spanning-rek lineair verloopt.

De uitoefening van een sinusoidale spanning met een constante amplitude (σ_0) op het proefstuk leidt hierbij tot een vervorming met dezelfde frequentie, maar met een faseverschuiving (φ). De stijfheidsmodulus, bij de temperatuur en de frequentie van de meting, is de verhouding tussen de amplitude van de spanning en de amplitude van de vervorming (figuur A1.6).

De tweepuntsbuigproef biedt de mogelijkheid om te peilen naar de impact van materiaalkeuzen en/of mengselontwerp op de stijfheidsmodulus van het asfaltmengsel.



Figuur A1.5 – Proefopstelling tweepuntsbuiging

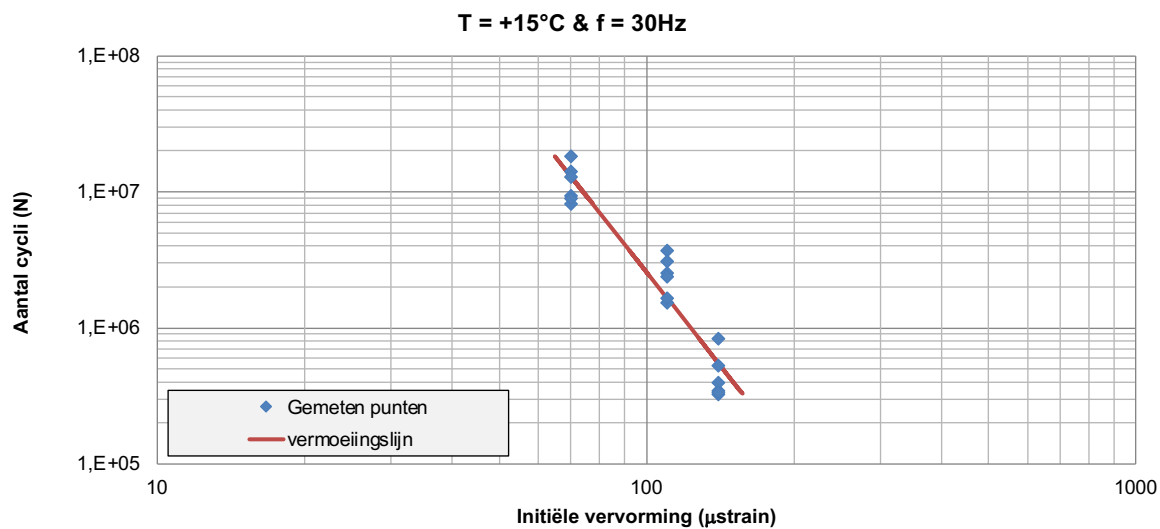


Figuur A1.6 – Principe van de tweepuntsbuigproef voor stijfheid

5. Vermoeiing

Met de proefopstelling voor de bepaling van de stijfheidsmodulus (tweepuntsbuigproef, figuur A1.5) kan ook de weerstand tegen scheurvorming door vermoeiing als gevolg van buigtrek worden bepaald, zoals beschreven in de norm NBN EN 12697-24 (NBN, 2018b). Er wordt een sinusoidaal variërende vervorming met constante amplitude opgelegd aan het trapeziumvormig proefstuk, waarbij men de kracht meet die hiertoe nodig is. De aangelegde vervorming is hoger dan bij de bepaling van de stijfheidsmodulus, zodat er vermoeiingsscheurtjes ontstaan waardoor het proefstuk geleidelijk bezwijkt. Hoe hoger de vervormingsamplitude (ϵ), hoe sneller de kracht zal afnemen door vermoeiing. Het bezwijkpunt wordt gedefinieerd als het aantal cycli waarbij de kracht nodig om het proefstuk te vervormen tot de helft van de initiële waarde is gereduceerd. Er kan dan een curve worden bepaald die het bezwijkpunt als functie van de rekamplitude weergeeft (figuur A1.7). De kenmerkende parameter ϵ_6 is de rek waarvoor het bezwijkpunt bij 1 miljoen cycli valt. Hoe hoger ϵ_6 , hoe beter het mengsel bestand zal zijn tegen schade door vermoeiing, bij de temperatuur en frequentie waarbij de proef werd uitgevoerd.

De tweepuntsbuigproef biedt de mogelijkheid om te peilen naar de impact van materiaalkeuzen en/of mengselontwerp op de vermoeiingsweerstand van het asfaltmengsel.



Figuur A1.7 – Bepaling van de vermoeiingsweerstand aan de hand van de rek ϵ_6

6. Weerstand tegen rafeling

De weerstand tegen rafeling wordt gemeten door middel van een toestel, waarmee men het effect van wringend verkeer op het oppervlak van een bitumineuze toplaag simuleert. OCW maakt hiervoor gebruik van een toestel van het type DSD (*Darmstadt Scuffing Device*), zoals beschreven in de CEN technical specification CEN/TS 12697-50 (CEN, 2018, figuur A1.8). In dit toestel wordt een band onder een verticale aslast neergelaten op het oppervlak van een proefplaat, die vervolgens een combinatie van een draaiende en een heen- en weergaande beweging uitvoert. Daardoor worden schuifspanningen opgewekt die rafeling veroorzaken. Het massaverlies van de plaat, als functie van het aantal belastingcycli, maakt het mogelijk om de rafelingsgevoeligheid van het asfaltmengsel te beoordelen.

De rafelingsproef biedt de mogelijkheid om te peilen naar de impact van materiaalkeuzen en/of mengselontwerp op de rafelingsgevoeligheid van het asfaltmengsel en is vooral belangrijk voor open mengsels met een discontinue korrelverdeling.



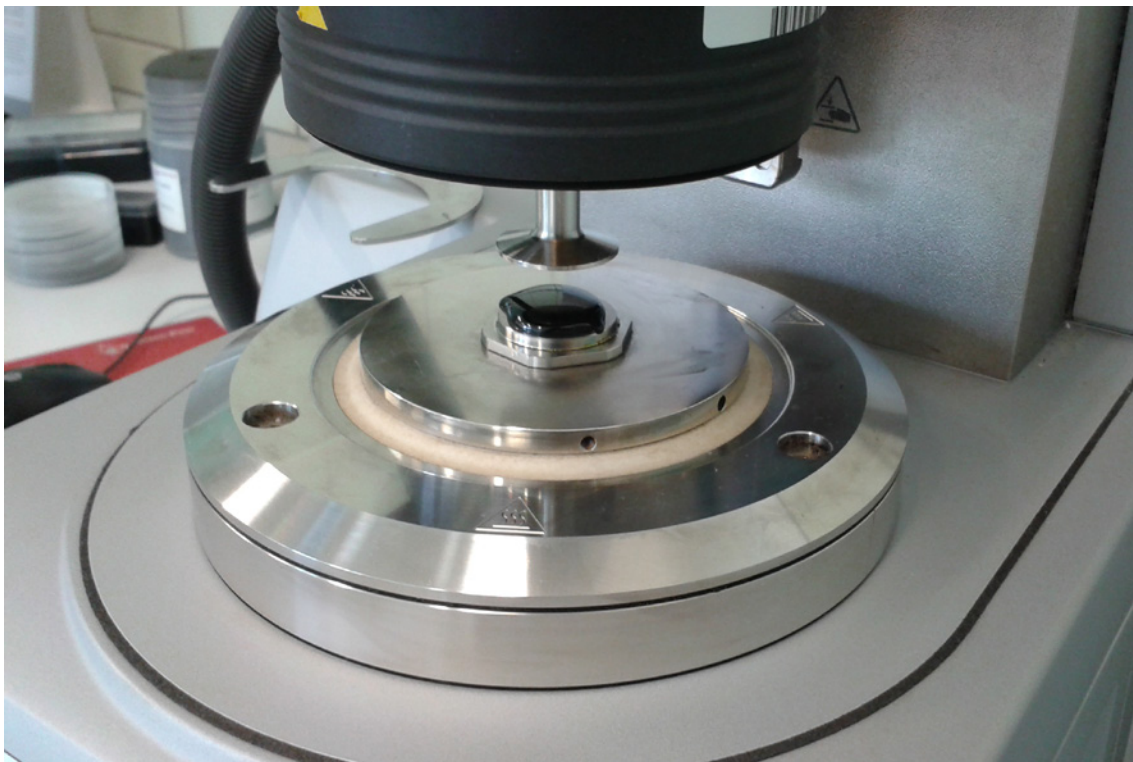
Figuur A1.8 – Rafelingsproef (Darmstadt Scuffing Device)

Bijlage 2

Prestatiegerichte proeven voor bitumineuze bindmiddelen

1. DSR

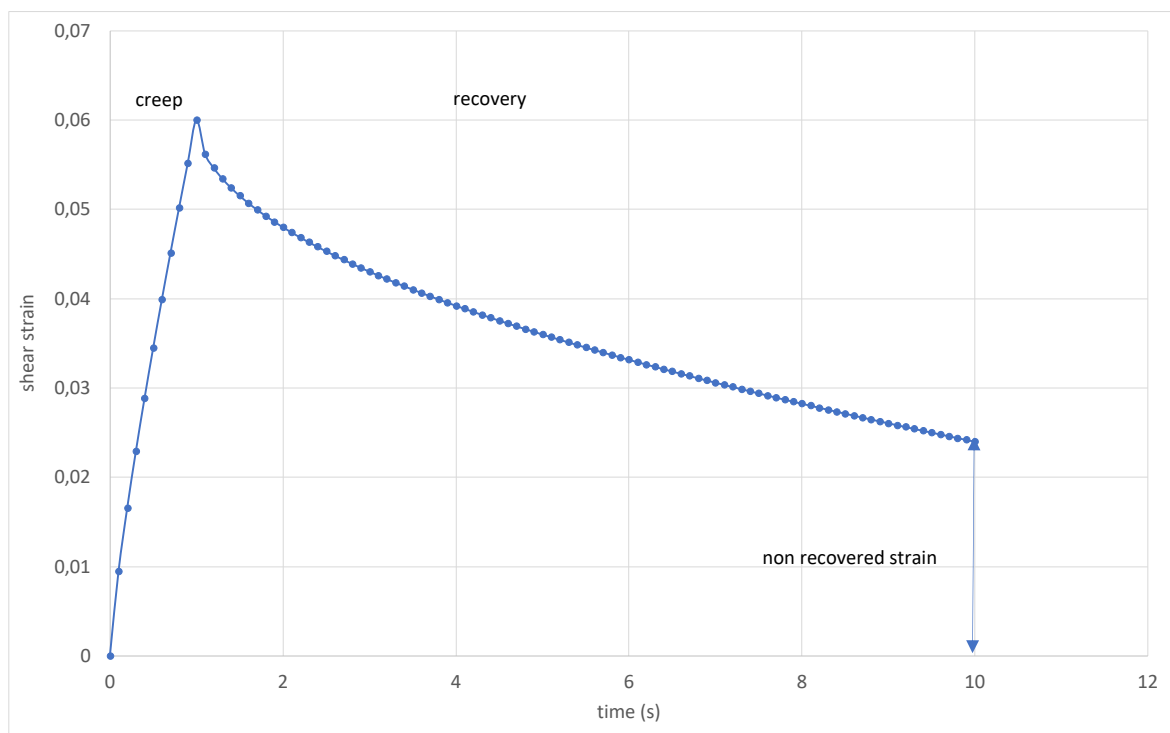
De Europese norm EN 14770 (NBN, 2012a) beschrijft een methode om de reologische eigenschappen van bitumineuze bindmiddelen te meten met gebruik van een *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) in oscillatiemode. Een monster geplaatst tussen twee parallelle schijfvormige platen wordt onderworpen aan een sinusvormige afschuifbelasting onder gecontroleerde temperatuur. De afschuifmodulus wordt afgeleid uit de verhouding van de amplitudes van de vervorming en de spanning, en de fasehoek uit het faseverschil tussen de sinusvormige spanning en vervorming. De procedure omvat de bepaling van de afschuifmodulus en de fasehoek over het gewenste bereik van frequenties en temperaturen.



Figuur A2.1 – Detail DSR apparatuur (parallel plate geometry)

2. MSCR

De Europese norm EN 16659 (NBN, 2016c) beschrijft de *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) test, die wordt uitgevoerd met een *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) in kruipmode (figuur A2.1). De MSCR-test heeft tot doel de gevoeligheid voor permanente vervorming van bitumineuze bindmiddelen te bepalen en wordt dus uitgevoerd in het domein van de hoge gebruikstemperaturen. De test bestaat erin om achtereenvolgens tien kruip-herstel cycli toe te passen (figuur A2.2), en dit bij achtereenvolgens een laag (0,1 kPa) en een hoog (3,2 kPa) spanningsniveau. De gemiddelde niet-herstelde vervorming (*non recovered strain*) van de 10 cycli bij 0,1 kPa is een indicator voor de gevoeligheid voor permanente vervorming en het verschil met het resultaat bij 3,2 kPa is een indicatie voor de spanningsgevoeligheid (de niet-lineariteit).



Figuur A2.2 – Illustratie van één kruip-herstelcyclus (1s kruip-9s herstel)

3. BBR

De Europese norm EN 14771 (NBN, 2012b) beschrijft een methode om de stijfheid te bepalen van bitumineuze bindmiddelen in het domein van de lage gebruikstemperaturen, met gebruik van een *Bending Beam Rheometer* (BBR) (figuur A2.3). Deze omvat een driepuntsbuigopstelling waarin balkvormige bitumenmonsters worden onderworpen aan een statische constante kracht, in een bad bij lage temperatuur. De buigstijfheid wordt bepaald uit de verhouding van de spanning tot de rek, gemeten na een bepaalde tijd. Met deze proef wordt een temperatuur bepaald, waarbij de stijfheid van het bitumen kritisch wordt voor lagetemperatuurscheurvorming.



Figuur A2.3 – BBR-apparatuur



Bijlage 3

Mengselontwerp in geval van poreuze aggregaten

Begrippen en definities

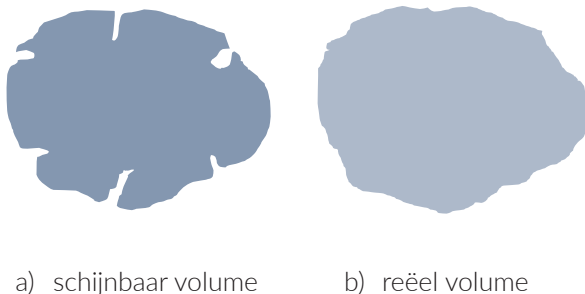
De norm voor de bepaling van de volumieke massa van aggregaten (NBN, 2013a) maakt een onderscheid tussen de schijnbare volumieke massa (*apparent particle density*) en de reële volumieke massa (*oven-dried particle density*).

De **schijnbare volumieke massa** is gedefinieerd als de massa na droging, gedeeld door het schijnbaar volume (dit is het volume, exclusief het volume van de watertoegankelijke poriën, figuur A3.1a).

$$\rho_{a, \text{agg}} = \text{droge massa/schijnbaar volume aggregaat}$$

De **reële volumieke massa** is gedefinieerd als de massa na droging, gedeeld door het reëel volume (dit is het volume, inclusief het volume van de watertoegankelijke poriën, figuur A3.1b).

$$\rho_{rd, \text{agg}} = \text{droge massa/reëel volume aggregaat}$$



Figuur A3.1 – Verschil tussen schijnbaar en reëel volume van een aggregaat

Noot:

- In het geval van weinig poreuze aggregaten (weinig watertoegankelijke poriën, met andere woorden verwaarloosbare waterabsorptie) is er geen significant verschil tussen schijnbaar en reëel volume.

De **porositeit P** wordt gedefinieerd als het volume van de watertoegankelijke poriën, ten opzichte van het reëel volume van het aggregaat:

$$P = \text{volume poriën} / \text{reëel volume aggregaat} \quad (1)$$

De porositeit bepaalt dus het verband tussen de schijnbare volumieke massa en de reële volumieke massa van het aggregaat:

$$\rho_{rd,agg} = (1-P) \cdot \rho_{a,agg} \quad (2)$$

De porositeit kan worden bepaald via waterabsorptie, gezien het volume geabsorbeerd water gelijk kan worden gesteld aan het volume van de watertoegankelijke poriën:

$$P = \frac{m_{wa} / \rho_w}{m_{agg} / \rho_{rd,agg}} \quad (3)$$

waarbij:

- m_{wa} : massa geabsorbeerd water
- ρ_w : volumieke massa water
- m_{agg} : massa droog aggregaat
- $\rho_{rd,agg}$: reële volumieke massa aggregaat

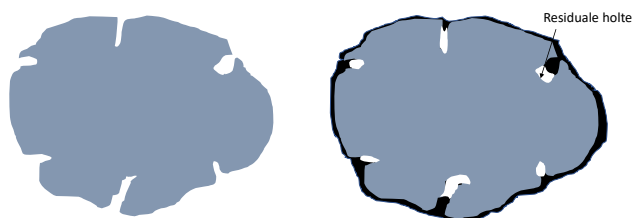
Deze vergelijking kan worden herleid tot:

$$P = w_a \rho_{rd,agg} / \rho_w \quad (4)$$

waarbij w_a de waterabsorptie van het aggregaat, gedefinieerd als:

$$w_a = m_{wc} / m_{agg} \quad (5)$$

Bij omhulling met bitumineus bindmiddel zullen de watertoegankelijke poriën deels gevuld worden met bindmiddel (figuur A3.2). De mate waarin het bindmiddel doordringt in de poriën is onder meer afhankelijk van de viscositeit van het bindmiddel: hoe lager de viscositeit, hoe dieper het bindmiddel doordringt. Het deel van de poriën dat bij omhulling niet wordt gevuld door bindmiddel noemen we de **residuale holten**.



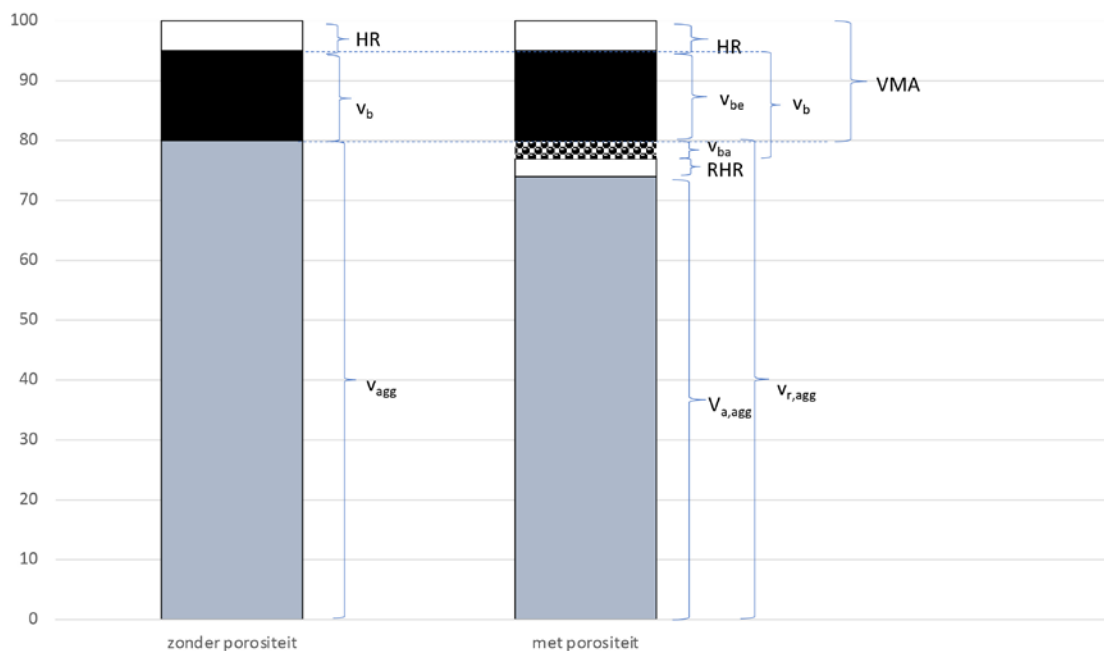
a) niet omhuld aggregaat b) met bitumen omhuld aggregaat

Figuur A3.2 – Residuale holten in met bitumen omhuld aggregaat

Een omhullingsproef met warm bitumen laat de experimentele bepaling toe van de residuale holten (Vansteenkiste & Piérard, 2014).

Impact van poreuze aggregaten op de volumetrie van een bitumeneus mengsel

Figuur A3.3 toont de volumetrie van een mengsel zonder poreuze aggregaten, in vergelijking met een mengsel met eenzelfde reëel volume aan poreuze aggregaten. In het geval van het mengsel met poreus aggregaat zal dit reëel volume bestaan uit het schijnbaar volume ($v_{a,agg}$) en het volume van de poriën (v_p). Het volume poriën wordt deels gevuld door geabsorbeerd bindmiddel (v_{ba}) en wat rest is het volume van de residuale holten (v_{rh}).



Figuur A3.3 – Volumetrie van een mengsel met porositeit, versus equivalent mengsel zonder porositeit (alle volumes uitgedrukt in procent van het totale volume)

De holle ruimte (HR) van een asfaltmengsel heeft betrekking op de holten die zich tussen de door bindmiddel omhulde minerale korrels bevinden. Er wordt geen rekening gehouden met de residuale holten in het poreuze aggregaat, omdat deze holle ruimte ingekapseld zit in het aggregaat en bijgevolg geen effect heeft op de mengselprestaties.

Het volume aan bindmiddel, geabsorbeerd in de poriën van het aggregaat (v_{ba}), is niet meer beschikbaar voor de omhulling en speelt dus ook geen effectieve rol in het mengsel. In geval van poreuze aggregaten zal men dus een groter volume aan bindmiddel (v_b) nodig hebben om het geabsorbeerd bindmiddel te compenseren, maar enkel het deel dat niet geabsorbeerd wordt (v_{be}) is effectief:

$$V_{be} = V_b - V_{ba} \quad (6)$$

waarbij:

- v_{be} : effectief volume bindmiddel
- v_b : totaal volume bindmiddel
- v_{ba} : geabsorbeerd volume bindmiddel

De VMA is de holle ruimte die zich bevindt tussen de reële volumes van de minerale korrels, en is dus de som van de holle ruimte en het volume effectief bindmiddel:

$$VMA = HR + v_{be} \quad (7)$$

In het algemene geval waarin de porositeit van de aggregaten verwaarloosbaar is, wordt de relatie:

$$VMA = HR + v_b \quad (\text{en } v_{ba}=0) \quad (8)$$

Concreet kan men hieruit afleiden dat de VMA, het volume effectief bindmiddel v_{be} en de effectieve holle ruimte HR van een mengsel dat poreuze aggregaten bevat op dezelfde manier worden berekend als in het geval van niet poreuze aggregaten. Men rekent daarvoor met het reëel volume van de aggregaten, dat wil zeggen met de reële volumieke massa ($\rho_{rd,agg}$). De holle ruimte en het effectieve bindmiddelgehalte kunnen aldus worden geoptimaliseerd en getoetst aan de eventuele bestekseisen voor holle ruimte en bindmiddelgehalte.

Voor de totale dosering van het bindmiddel moet er ten slotte nog rekening worden gehouden met het volume bindmiddel geabsorbeerd door het poreuze aggregaat, v_{ba} . Dit moet worden opgeteld bij het effectieve volume bindmiddel.

In wat volgt wordt nader uitgelegd hoe men in PradoWeb dient om te gaan met poreuze aggregaten, en hoe men de extra hoeveelheid bindmiddel, die de hoeveelheid geabsorbeerd bindmiddel moet compenseren, kan inschatten.

PradoWeb in geval van poreuze aggregaten en berekening van de totale hoeveelheid bindmiddel

Zoals gebruikelijk wordt de samenstelling van het aggregaat ingevoerd in massapercentages en rekent PradoWeb de samenstelling om naar volumepercentages aan de hand van de reële volumieke massa's. Men berekent de holle ruimte in het minerale skelet (VMA). Dit is de holle ruimte die zich bevindt tussen de minerale korrels van het droge aggregaat, en omvat dus niet de holle ruimte in de poriën van de stenen. De VMA, verminderd met het volume van het effectieve (=omhullende) bindmiddel (v_{be}), geeft de holle ruimte van het mengsel, die bepalend is voor de eigenschappen van het mengsel (mengselstijfheid, weerstand tegen spoorvorming, weerstand tegen scheurvorming, enz.).

Nadien moet enkel het bindmiddelgehalte nog worden verhoogd, om de hoeveelheid bindmiddel geabsorbeerd door de poreuze aggregaten te compenseren. Dat wordt als volgt berekend:

Het geabsorbeerd volume bindmiddel (v_{ba}) is gelijk aan het volume van de poriën (v_p), verminderd met het volume van de residuale holten in het poreuze aggregaat (v_{rh}).

$$v_{ba} = v_p - v_{rh} \quad (9)$$

Indien de poreuze aggregaatfractie een volumepercentage v_i bedraagt van het reëel volume van het aggregaat, bedraagt het volume aggregaatporiën in het totale mengselvolume:

$$v_p = \sum_{i=1}^n (P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (10)$$

waarbij:

P_i : de porositeit van de aggregaatfractie i

v_i : het volumepercentage van aggregaatfractie i in het volume aggregaat

$v_{r,agg}$: het volumepercentage aggregaat in het mengsel

Het volume van de residuale holten bedraagt:

$$v_{rh} = \sum_{i=1}^n (a_i * P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (11)$$

Waarbij a_i het volume is van de residuale holten, gedeeld door het volume van de poriën, voor de aggregaatfractie i ($a_i < 1$).

Deze verhouding a_i kan in principe voor elk poreus aggregaat worden gemeten met de interne meetmethode [2]. Doch, de mate waarin de poriën bindmiddel absorberen tijdens de productie van een asfaltmengsel is moeilijk te voorspellen, want dit zal afhangen van vele factoren (mengtemperatuur, -duur, -intensiteit, enz.). Als eerste benadering kan men voor alle poreuze aggregaten a_i gelijkstellen aan $1/3$, wat betekent dat de poriën gemiddeld genomen voor een derde gevuld worden met geabsorbeerd bindmiddel.

Noot: De keuze voor $1/3$ is een zeer arbitraire keuze, omdat het moeilijk is in te schatten in welke mate de poriën gevuld worden met bindmiddel. Helemaal geen rekening houden met het fenomeen van bindmiddelabsorptie zou echter leiden tot een te laag bindmiddelgehalte.

Het volume geabsorbeerd bindmiddel wordt dan:

$$v_{ba} = (1/3) * \sum_{i=1}^n (P_i * v_i * v_{r,agg}) \quad (12)$$

Het volume geabsorbeerd bindmiddel v_{ba} , wordt ten slotte omgerekend naar een massapercentage (in % van de totale massa van het mengsel):

$$m_{ba}(m\% \text{ in}) = v_{ba} (v\% \text{ in}) * (\rho_b / SVM) \quad (13)$$

waarbij:

ρ_b : de volumieke massa van het bindmiddel

SVM: de schijnbare volumieke massa van het mengsel

Het totaal te doseren bindmiddelgehalte wordt dan:

$$m_b = m_{be} + m_{ba} \quad (14)$$

Methodologie aan de hand van een rekenvoorbeeld

Tabel A3.1 toont een rekenvoorbeeld voor het geval van een mengsel type SMA, waarvan het aggregaat voor 68,8 v% uit poreus aggregaat bestaat. Er werd een simulatie gedaan met een lage porositeit en een hoge porositeit. Voor de PradoWeb-studie werd gerekend met eenzelfde reële volumieke massa van de aggregaten, zodat de resultaten identiek zijn.

Er werd verondersteld dat de watertoegankelijke poriën voor een derde gevuld worden met geabsorbeerd bindmiddel. Men merkt op dat, in het geval van een hoge porositeit, de bindmiddelaabsorptie een significante impact heeft op de totale hoeveelheid benodigd bindmiddel.

	lage porositeit	hoge porositeit	resultaat bepaald via
Kenmerken poreus aggregaat:			
Waterabsorptie w_a	0,3 %	2,5 %	meting (EN 1097-6)
$\rho_{rd,agg}$	2,728 Mg/m ³	2,728 Mg/m ³	meting (EN 1097-6)
P	0,82 %	6,82 %	formule (4)
PradoWeb studie:			
$v_{r,agg}$	75,50 %	75,50 %	PradoWeb
VMA	24,50 %	24,50 %	PradoWeb
v_{be}	13,96 %	13,96 %	PradoWeb
HR	10,54 %	10,54 %	PradoWeb
SVM	2,195 Mg/m ³	2,195 Mg/m ³	PradoWeb
effectief bindmiddelgehalte (m% in het mengsel)	6,50 %	6,50 %	PradoWeb
v (% poreus aggregaat in het totale aggregaat)	68,77 %	68,77 %	PradoWeb
$v^* v_{r,agg}$	51,92 %	51,92 %	PradoWeb
Correctie bindmiddelgehalte voor bindmiddelaabsorptie:			
$v_p = P^* v^* v_{r,agg}$	0,42 %	3,54 %	formule (10)
v_{ba} (geschat als 1/3 van v_p)	0,14 %	1,18 %	formule (12)
geabsorbeerd bindmiddelgehalte (m% in het mengsel)	0,06 %	0,54 %	formule (13)
totaal bindmiddelgehalte (m% in het mengsel)	6,56 %	7,04 %	formule (14)

Tabel A3.1 – Rekenvoorbeeld voor het geval van een mengsel type SMA, waarvan het aggregaat voor 68,8 v% uit poreus aggregaat bestaat

Ressorterende en steunende leden kunnen de OCW-publicaties kosteloos bestellen. Deze publicatie is enkel elektronisch beschikbaar.

Meer informatie:

<https://brrc.be/nl/expertise/publicaties>

Deze publicatie bestellen:

publication@brrc.be




Kenmerk: A 105 – Prijs: € 16 (excl. 6 % btw)

Andere publicaties in de reeks “Aanbevelingen”

Handleidingen (kenmerk A) zijn gericht op de praktijk van het ontwerpen, uitvoeren en onderhouden van wegen. Zij bundelen de bevindingen van werkgroepen die OCW met betrekking tot welbepaalde onderwerpen heeft opgericht.

Kenmerk	Titel	Prijs
A 104	Handleiding voor de uniaxiale cyclische drukproef voor gietasfalt	10,00 €
A 102	Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp of onderhoud van wegconstructies	20,00 €
A 98	Handleiding voor slemlagen	16,00 €
A 96	Handleiding voor de verwerking van bitumineuze mengsels	20,00 €
A 88/14	Handleiding voor de bescherming van wegconstructies tegen de inwerking van water	18,00 €
A 84/12	Handleiding voor niet-chemisch(e) onkruidbeheer(sing) op verhardingen met kleinschalige elementen + Bijlage (Beslisboom voor onkruidbeheer(sing) op verhardingen met kleinschalige elementen)	20,00 €
A 83/12	Handleiding voor het ontwerp, de aanbrenging en het onderhoud van bedekkingen op betonnen brugdekken	32,00 €
A 82/11	Handleiding voor industriële buitenverhardingen in beton	17,00 €
A 81/10	Handleiding voor grondbehandeling met kalk en/of hydraulische bindmiddelen + 4 praktijkgidsen – Verbetering van grond voor de aanvulling van rioolsleuven en de omhulling van buizen – Stabilisatie van grond voor onderfunderingslagen – Verbetering van grond bij grondwerken en voor het baanbed – Behandeling van grond voor funderingen onder bedrijfsvloeren.	26,50 €
A 72/02	Handleiding voor de bereiding van bitumineuze mengsels	20,00 €
A 71/01	Handleiding voor bestrijkingen	10,00 €

Andere OCW-reeksen

-  Researchverslag
-  Meetmethode
-  Synthese



Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw
Samen voor duurzame wegen

Instelling erkend bij toepassing van de besluitwet van 30 januari 1947
Woluwedal 42
1200 Brussel
Tel.: 02 775 82 20
www.ocw.be

Deze handleiding beschrijft de door het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw aanbevolen methode voor het ontwerp van bitumineuze mengsels.

Mengselontwerp betreft het maken van een juiste keuze van de bestanddelen en van hun proportionele samenstelling, als functie van het type mengsel en de beoogde mengselprestaties. Samen met de productie en de verwerking van het bitumineuze mengsel is het mengselontwerp een cruciale fase in het tot stand komen van een duurzame asfaltverharding.

OCW beveelt een methode aan waarmee de ontwerper op een rationele en efficiënte wijze aan mengselontwerp kan doen. De methode zet sterk in op theoretisch mengselontwerp, zodat het aantal vereiste laboratoriumproeven tot een minimum wordt beperkt.

Deze handleiding beschrijft de theoretische principes en de berekeningsmethodes, zoals geïmplementeerd in de OCW-applicatie voor theoretisch mengselontwerp PradoWeb. Het basisprincipe is dat het mengsel wordt samengesteld in volumedelen. Er wordt dan ook uitgebreid ingegaan op het belang van de volumetrie van bitumineuze mengsels en de impact ervan op de prestaties.

De volledige ontwerpprocedure wordt geïllustreerd aan de hand van een aantal praktische voorbeelden. Er wordt ook getoond hoe de methodologie van theoretisch mengselontwerp kan worden ingezet in het kader van de dagelijkse werking van een asfaltcentrale, niet enkel voor het ontwerp van nieuwe mengsels, maar ook voor het bijsturen van de mengselsamenstelling tijdens de productie en het inschatten van de impact van bepaalde veranderingen in samenstelling en materiaalkenmerken.

ITRD-trefwoorden

0152 – UNIVERSEEL ONTWERP ; 0187 – NORM ; 4105 – ZAND ; 4555 – BOUWMATERIAAL ; 4573 – HERGEBRUIK ; 4577 – GRANULAAT ; 4599 – VULSTOF ; 4948 – BINDMIDDEL ; 4967 – BITUMINEUS MENGSEL ; 5925 – KENMERKEN ; 6255 – PROEF ; 6464 – BEREKENING ; 7142 – VOLUMETRIC ANALYSIS ; 8513 – CLASSIFICATIE ; 8645 – PROGRAMMATUUR ; 9078 – THEORIE ; 9102 – METHODE