

Toetsingsprocedure gerealiseerde constructie flexibele verhardingen

IR – N - 04.006

Versie november 2008

1. Doel procedure

Deze procedure is bedoeld voor gebruik in contractvormen voor nieuwe aanleg van flexibele verhardingen waarbij de opdrachtnemer ontwerprijheid heeft. Zij legt de methodiek vast waarmee kan worden getoetst of de gerealiseerde verharding, voor wat betreft de laagdikten en stijfheidsmoduli van de constructielagen, overeenstemt met de door opdrachtnemer gehanteerde ontwerpuitgangspunten.

Een eventueel tegenvallende duurzaamheid van de constructie ten gevolge van andere factoren dan stijfheidsmoduli en laagdikten wordt door deze toetsing dus niet afgedekt

De scope van deze toetsingsprocedure zijn flexibele verhardingen met een verwachte stijfheidsmodulus van de ondergrond (zie hoofdstuk 5) van tenminste 50 MPa en een ontwerpstijfheidsmodulus van de fundering van maximaal 1400 MPa.

2. Metingen

Voor deze toetsingsprocedure is meting van deflecties en verhardingstemperaturen benodigd. De deflectiemetingen dienen tenminste 6 maanden na aanleg van de verharding, maar niet langer dan 12 maanden daarna, te worden uitgevoerd op de te onderzoeken rijstroken.

De valgewichtdeflectiemetingen dienen te worden uitgevoerd conform CROW - publicatie 92 [1] (zie hoofdstuk 9) met een valgewichtdeflectie-apparaat dat is voorzien van een geldig bewijs van kalibratie, verstrekt door het CROW. Hierbij dienen tenminste de deflecties worden gemeten op de geofoonposities 0 mm, 300 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm en 1800 mm vanuit het hart van de voetplaat van het deflectie – apparaat.

2.1 Vaststellen meetvakken

Voor het uitvoeren van de metingen verdeelt ON het werk in meetvakken die de te onderscheiden verhardingsconstructies vertegenwoordigen.

2.2 Uitvoeren meting

De metingen moeten voor deze procedure op de te bemeten rijstrook worden uitgevoerd in een meetraai tussen de rijsporen (in het vervolg aangeduid als “het tussenspoor”). Hierbij dient de onderlinge afstand van de meetpunten minimaal 10 en maximaal 50 m te bedragen. Per meetpunt worden tenminste 4 klappen gegeven met een nominale belasting van 50 kN.

Voor verdere details wordt verwezen naar CROW - publicatie 92 [1] (zie hoofdstuk 10). In afwijking van deze publicatie moet de asfalttemperatuur gemeten worden op een enkele meetdiepte van 10 cm.

Tijdens de deflectiemeting moet de asfalttemperatuur tussen 15°C en 25°C liggen. Bij elk meetpunt dient de locatie (baan-, strook- en spoor aanduiding, kilometrering), het tijdstip van de deflectiemeting alsmede de corresponderende asfalttemperatuur te worden opgeslagen conform CROW - publicatie 92 [1] (zie hoofdstuk 9).

3. Verwerken meetresultaten

Per meetvak dienen de deflectiemetingen per onderzochte rijstrook te worden uitgewerkt.

3.1 Uitwerking per meetpunt

Eerst worden de metingen per meetpunt uitgewerkt. Van de 4 in het meetpunt gemeten deflectieprofielen wordt het eerst gemeten profiel buiten beschouwing gelaten en worden de overige 3 deflectieprofielen genormaliseerd naar een belasting van 50 kN waarna de deflecties per geofoonpositie worden gemiddeld. De deflecties worden echter niet voor temperatuur genormaliseerd.

Zogenaamde uitbijters in de deflecties mogen buiten beschouwing worden gelaten, op voorwaarde dat deze nadrukkelijk worden gerapporteerd en op plausibele wijze worden verklaard (een voorbeeld hiervan is een meetpunt op een duiker, waar over het algemeen aanzienlijk lagere deflecties worden gevonden).

3.2 Maken subvakindeling

Per meetvak mag de variatiecoëfficiënt van de voor belasting genormeerde centrumdeflecties in het tussenspoor niet meer bedragen dan 15%. Indien hieraan niet wordt voldaan, wordt een subvakindeling gezocht waarbij de variatiecoëfficiënt in het tussenspoor per subvak maximaal 15 % bedraagt. Het aantal meetpunten per subvak dient daarbij minimaal 12 te bedragen.

Indien geen subvakindeling kan worden gevonden die aan deze voorwaarden voldoet, dient een zodanige subvakindeling gemaakt te worden dat de variatie - overschrijding minimaal is. Ook hierbij dient het aantal meetpunten per subvak tenminste 12 te bedragen. De variatie - overschrijding is gedefinieerd als:

$$\text{variatie - overschrijding} = \sum_{i=1}^n (CV_i - 15\%) \cdot l_i \quad (2)$$

hierin is:

CV_i = variatiecoëfficiënt van de genormeerde centrumdeflecties in subvak i waarin de variatiecoëfficiënt meer bedraagt dan 15 % (%)

n = het aantal subvakken waarin de variatiecoëfficiënt meer bedraagt dan 15 % (-)

l_i = lengte van subvak i waarin de variatiecoëfficiënt meer bedraagt dan 15 % (m)

De gevonden subvakindeling wordt ook voor het rechterspoor aangehouden.

Elk der partijen heeft het recht om een meer optimale subvakindeling te verlangen indien hij deze binnen bovengenoemde voorwaarden kan aanwijzen¹.

Indien geen subvakindeling behoeft te worden gemaakt, wordt in het vervolg van deze procedure onder 'subvak' verstaan het gehele meetvak.

¹ Voor het maken van een subvakindeling is geen gesloten oplossing beschikbaar

3.3 Vaststellen gemiddelde genormeerde deflectieprofiel per subvak

Per subvak worden de per meetpunt verkregen gemiddelde genormaliseerde deflectieprofielen (zie par. 3.1) per gefoonpositie gemiddeld over het subvak. Tevens wordt per subvak de gemiddelde asfalttemperatuur tijdens de deflectiemetingen bepaald op basis van de asfalttemperaturen per meetpunt.

4. Vaststellen laagdikten

Over het meetvak dient een aantal boorkernen te worden genomen uit het asfaltpakket en (indien mogelijk) de funderingslaag. De keuze voor het aantal boorkernen is aan opdrachtnemer², met dien verstande dat dit aantal minimaal 10 bedraagt.

De boorlocaties worden in overleg met de directie aselect genomen. De kosten van boren en de bijbehorende afzettingen zijn voor rekening opdrachtnemer.

Na het boren worden de boorkernen naar een onafhankelijk Sterlab - geaccrediteerd laboratorium verzonden voor bepaling van de laagdikten conform proef 152 van de Standaard RAW – Bepalingen.

Indien uit de funderingslaag geen boorkernen kunnen worden genomen worden de laagdikten van de fundering opgemeten in het boorgat. Indien profielmetingen beschikbaar zijn van het zand bed voor aanbrengen van de fundering en van de voltooide funderingslaag, mogen de funderingsdikten ook worden bepaald uit het verschil in profielhoogte op overeenkomstige locaties.

Op grond van de volgens het bovenstaande bepaalde laagdikten moet met 95 % zekerheid worden aangetoond dat de asfaltdikte over niet meer dan 5,0 % van het wegvak 20 mm of meer dunner is dan de ontwerpasfaltdikte. Voor de funderingslaag moet aangetoond worden dat de funderingsdikte over niet meer dan 5,0 % van het wegvak 40 mm of meer dunner is dan de funderingsdikte volgens het ontwerp. De hierbij te gebruiken statistische toets is omschreven in Appendix A.

Indien de asfaltdikten niet aan de eis voldoen, wordt een 'werkelijk asfaltdikte – tekort' berekend volgens Appendix A.

Indien de funderingsdikten niet aan deze eis voldoen wordt een 'equivalent asfaltdikte – tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' bepaald volgens Appendix A.

5. Vaststellen van de verwachte stijfheidsmoduli

De teruggerekende stijfheidsmoduli zullen worden vergeleken met de waarden die volgens het ontwerp verwacht dienen te worden onder de meetcondities van de valgewichtdeflectiemeting. Hierbij wordt uitgegaan van een drielagensysteem, bestaande uit de ondergrond, een funderingslaag en een asfaltpakket.

Indien meer dan één funderingslaag aanwezig is wordt slechts de bovenste funderingslaag in beschouwing genomen. Eventuele diepere funderingslagen worden verdisconteerd door deze te vertalen in een equivalente stijfheidsmodulus voor de ondergrond. Afzonderlijke ondergrondlagen worden op dezelfde manier verdisconteerd.

² Met behulp van Appendix A kan opdrachtnemer zelf een inschatting maken van het benodigd aantal kernen, rekening houdend de gemiddelde laagdikte en de spreiding daarin zoals hij die zelf verwacht, b.v. op basis van eigen bedrijfscontrole.

De equivalente stijfheidsmodulus voor de ondergrond is dus de equivalente stijfheidsmodulus voor het gehele pakket dat zich onder het asfaltpakket en de (eventuele) bovenste funderingslaag bevindt. Onder equivalent wordt in dit verband verstaan de stijfheidsmodulus waarbij het theoretische deflectieprofiel bij valgewichtdeflectiemeting het minst afwijkt van het theoretische deflectieprofiel van het volledige lagenpakket. Opdrachtnemer dient deze equivalente stijfheidsmodulus voor de ondergrond in zijn ontwerp aan te geven.

De verwachte stijfheidsmodulus van de ondergrond wordt gelijk gesteld aan bovengenoemde equivalente ondergrondmodulus.

De verwachte stijfheidsmodulus voor de funderingslaag wordt in eerste instantie³ gelijk gesteld aan de in het ontwerp gebruikte stijfheidsmodulus van de bovenste funderingslaag.

Indien er geen fundering is toegepast wordt gerekend met een fictieve fundering met een dikte van 0,25 m en een stijfheidsmodulus die gelijk is aan de verwachte stijfheidsmodulus voor de ondergrond.

De verwachte stijfheidsmodulus voor het asfalt wordt bepaald door de stijfheidsmodulus, zoals gebruikt in het ontwerp, te corrigeren voor de belastingsfrequentie van de valgewichtdeflectiemeting en de temperatuur tijdens de deflectiemeting. Dit geschiedt door de bij het ontwerp gebruikte stijfheid - temperatuurskarakteristiek af te lezen bij een fictieve temperatuur T_{fict} (°C) die wordt bepaald op grond van de zogenaamde uitwisselbaarheid van temperatuur T (°C) en frequentie f (Hz) volgens onderstaande formule (1):

$$\frac{1}{T_{fict} + 273} = \frac{1}{T + 273} - \frac{1}{11242} \cdot \log\left(\frac{f_{kar}}{f}\right) \quad (1)$$

waarin

- T_{fict} = fictieve temperatuur waarbij stijfheidskarakteristiek wordt afgelezen (°C)
- T = werkelijke temperatuur asfalt bij deflectiemeting (°C)
- f_{kar} = frequentie waarvoor stijfheidskarakteristiek geldt (Hz)
- f = frequentie belasting valgewichtdeflectiemeting (20 Hz)

Indien in het ontwerp geen stijfheid - temperatuurskarakteristiek is aangegeven, wordt de ontwerpstijfheidsmodulus gecorrigeerd met een factor ter grootte van de verhouding tussen de stijfheid volgens de S78 – karakteristiek uit de Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Verhardingen [3] bij valgewichtdeflectie - condities en die bij de ontwerpcondities.

Indien in het ontwerp is gerekend met verschillende stijfheidskarakteristieken voor de afzonderlijke lagen van het asfaltpakket, dient het corrigeren van de stijfheidsmodulus per laag te geschieden; vervolgens dient een samengestelde stijfheidsmodulus van het gehele asfaltpakket te worden bepaald volgens Appendix D.

³ De verwachte stijfheidsmodulus voor de fundering kan later in de procedure worden opgehoogd als uit de terugrekening blijkt dat de stijfheidsmodulus van de ondergrond lager is dan de in het ontwerp gebruikte waarde (zie hoofdstuk 7).

6. Terugrekening laagstijfheden uit de deflectiemeting

Uit de gemeten deflecties dienen per subvak stijfheidsmoduli voor het asfalt, de fundering en de ondergrond te worden teruggerekend. Hierbij worden de volgende randvoorwaarden gehanteerd:

- Uitgegaan dient te worden van het gemiddelde genormeerde deflectieprofiel per subvak volgens par.3.3.
- Meerdere asfaltlagen dienen als een enkele laag te worden samengenomen.
- Van meerdere funderingslagen wordt slechts de bovenste laag afzonderlijk onderscheiden; alle diepere funderingslagen alsmede eventuele afzonderlijke ondergrondlagen dienen als een enkele ondergrondlaag te worden samengenomen
- Indien er geen funderingslaag aanwezig is wordt de bovenste 0.25 m van de ondergrond als funderingslaag geschematiseerd
- Er dient een lineair elastisch meerlagenprogramma te worden gebruikt dat voldoet aan de nauwkeurigheidstoets volgens appendix 3 van CROW – publicatie 92 [1].
- Gerekend dient te worden met volledige hechting tussen alle lagen
- De laagdikten voor de verschillende lagen dienen te worden vastgezet op de gemiddelde laagdikten volgens de boorkernen (zie hoofdstuk 4)
- De Poissonverhoudingen voor de verschillende lagen dienen te worden vastgezet op de bij het ontwerp gehanteerde waarden
- Er mogen geen weegfactoren afwijkend van 1 worden toegepast op de deflecties
- Alle deflecties op de voorgeschreven geofoonposities (zie hoofdstuk 2) dienen te worden meegenomen

Bij het terugrekenen van de stijfheidsmoduli voor de constructielagen dient per subvak een minimalisatie plaats te vinden van de “RMS” (root mean square), de wortel van de kwadraatsom van de afwijkingen tussen gemeten en berekende deflecties volgens

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{i,berekend} - \delta_{i,gemeten})^2}{n}} \quad (2)$$

Hierbij dient tevens berekening en rapportage plaats te vinden van de “Fit” volgens

$$Fit = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|\delta_{i,berekend} - \delta_{i,gemeten}|}{\delta_{i,gemeten}}}{n} \cdot 100 \% \quad (3)$$

In formules (2) en (3) is

$\delta_{i,berekend}$ = berekende deflectie opnemer i (μm)

$\delta_{i,gemeten}$ = gemeten deflectie opnemer i (μm)

n = aantal geofoonposities per deflectieprofiel (-)

De waarde voor RMS dient zo klein mogelijk te zijn. Partijen hebben het recht om na te gaan of binnen bovengenoemde randvoorwaarden een waarde voor RMS gerealiseerd kan worden die meer dan 5% lager is dan de gerapporteerde waarde. Indien dit zich voordoet, zullen de metingen opnieuw worden uitgewerkt op kosten van de partij die voor het uitwerken van de metingen verantwoordelijk is.

7. Vergelijken van de stijfheidsmoduli

7.1 Stijfheidsmodulus ondergrond

De teruggerekende stijfheidsmodulus van de ondergrond dient voor elk subvak tenminste gelijk te zijn aan de verwachte waarde volgens hoofdstuk 5. Indien hieraan niet wordt voldaan is compensatie mogelijk in de stijfheidsmoduli van de overige lagen.

Hiervoor dient de verwachte stijfheidsmodulus van de fundering in het subvak te worden verhoogd volgens Appendix B. In het navolgende wordt dan deze verhoogde stijfheidsmodulus als de verwachte stijfheidsmodulus van de fundering voor het subvak gehanteerd.

7.2 Stijfheidsmoduli asfalt en fundering

Uit de teruggerekende en verwachte stijfheidsmoduli voor het asfaltpakket en de fundering van het subvak worden vervolgens de zogenaamde shiftfactoren bepaald. Deze zijn gedefinieerd als:

$$\text{Shiftfactor asfaltstijfheid} = \frac{\text{teruggerekende stijfheidsmodulus asfaltpakket}}{\text{verwachte stijfheidsmodulus asfaltpakket}} \quad (4)$$

en

$$\text{Shiftfactor funderingsstijfheid} = \frac{\text{teruggerekende stijfheidsmodulus fundering}}{\text{verwachte stijfheidsmodulus fundering}} \quad (5)$$

waarin de verwachte stijfheidsmodulus van de fundering voor het subvak zonodig is gecorrigeerd voor een te lage stijfheidsmodulus van de ondergrond in het subvak (zie par. 7.1).

Indien de shiftfactor van de asfaltstijfheid en/of de shiftfactor van de funderingsstijfheid kleiner is dan 1,00 dient de terugrekening te worden herhaald waarbij de stijfheidsmodulus van de fundering over het subvak wordt vastgezet op de verwachte waarde (zonodig gecorrigeerd voor een te lage stijfheidsmodulus van de ondergrond in het subvak, zie par. 7.1). Van de dan teruggerekende stijfheidsmodulus van het asfaltpakket over het subvak dient de shiftfactor tenminste 1 te bedragen⁴. Indien niet aan deze eis wordt voldaan, wordt een 'equivalent asfaltdikte – tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli' berekend conform Appendix C.

⁴ Door de gevolgde procedure zijn alle stijfheidsafwijkingen vertaald in een stijfheidsafwijking van de asfaltlaag.

8. Bepalen van eventuele tekortkomingen

Op basis van de resultaten uit de voorgaande hoofdstukken wordt per subvak het totale asfaltdikte – tekort berekend als de som van:

- Het 'werkelijk asfaltdikte - tekort' dat volgens hoofdstuk 4 voor het gehele meetvak wordt bepaald indien de asfaltdikten niet voldoen aan de in dat hoofdstuk genoemde eis;
- Het 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' dat volgens hoofdstuk 4 voor het gehele meetvak wordt bepaald indien de funderingsdikten niet voldoen aan de in dat hoofdstuk genoemde eis;
- Het 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli' dat volgens hoofdstuk 7 voor het subvak wordt berekend indien de stijfheidsmoduli in het subvak niet voldoen aan de ontwerputgangspunten;

Het is toegestaan om een eventueel overschot aan asfaltdikte, indien dat volgt uit de toetsing volgens hoofdstuk 4, te verrekenen met een eventueel 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' of een eventueel 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli'. Andere verrekeningen zijn niet toegestaan.

9. Rapportage

De rapportage moet tenminste omvatten:

- algemene gegevens
 - een aanduiding van het werk, het besteksnummer
 - een omschrijving van de uitgevoerde metingen en de locaties daarvan
 - de gemeten deflecties, zowel in tabelvorm als grafisch
 - de meettemperaturen
- de eerstelijnsverwerking van de meetgegevens
 - de gemaakte subvakindeling
 - het aantal meetpunten en de variatiecoëfficiënt van de centrumdeflecties per subvak
 - het gemiddelde genormeerde deflectieprofiel per subvak
 - de in rekening gebrachte asfalttemperaturen per subvak
- de analyse van de uitgevoerde laagdiktemetingen per meetvak
 - de asfaltdikten en eventuele asfaltdiktetekorten
 - de funderingsdikten en eventuele equivalente asfaltdiktetekorten
- de analyse van de stijfheidsmoduli per subvak
 - de verwachte stijfheidsmoduli van de in de terugrekening onderscheiden lagen conform hoofdstuk 4
 - het teruggerekende deflectieprofiel en de afwijking daarvan (RMS en FIT) t.o.v. het gemiddelde genormeerde deflectieprofiel
 - de teruggerekende ondergrondmodulus en, indien lager dan de verwachte modulus, de bijbehorende verhoging van de verwachte funderingsmodulus
 - de teruggerekende stijfheidsmoduli voor asfalt en fundering, de bijbehorende shiftfactoren en het eventuele laagdiktekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli
- indien van toepassing de berekening van het totale asfaltdiktetekort per subvak

10. Van toepassing verklaarde hoofdstukken CROW – publicatie 92

De volgende onderdelen van CROW – publicatie 92 [1] worden van toepassing verklaard:

Paragraaf.3.3: Eisen aan onderdelen van het valgewicht

Hoofdstuk 5: Meetprocedure

Hoofdstuk 6: Uitwerking van de meetgegevens

Hoofdstuk 8: Laagstijfheid en structurele conditie

Referenties

- [1] Deflectieprofiel geen valkuil meer
CROW – publicatie 92, Stichting CROW, Ede, 1995
- [2] Toetsingsprocedure deflecties flexibele verhardingen voor innovatieve contractvormen met meerjarige garantie - of onderhoudsperiode. IR-N-04.007, versie 25 maart 2005
- [3] Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 4e editie, 1998.
- [4] Confidence intervals for the percent nonconforming based on variables data.
H. Weingarten, Journal of quality Technology, vol 14, no. 4, 1982, pp207-210.

Appendix A Toetsing laagdikten

Toetsingsprocedure

De in het werk gemeten laagdikten dienen te worden vergeleken met de in het ontwerp gebruikte laagdikten.

Hierbij moet met 95% zekerheid kunnen worden aangetoond dat

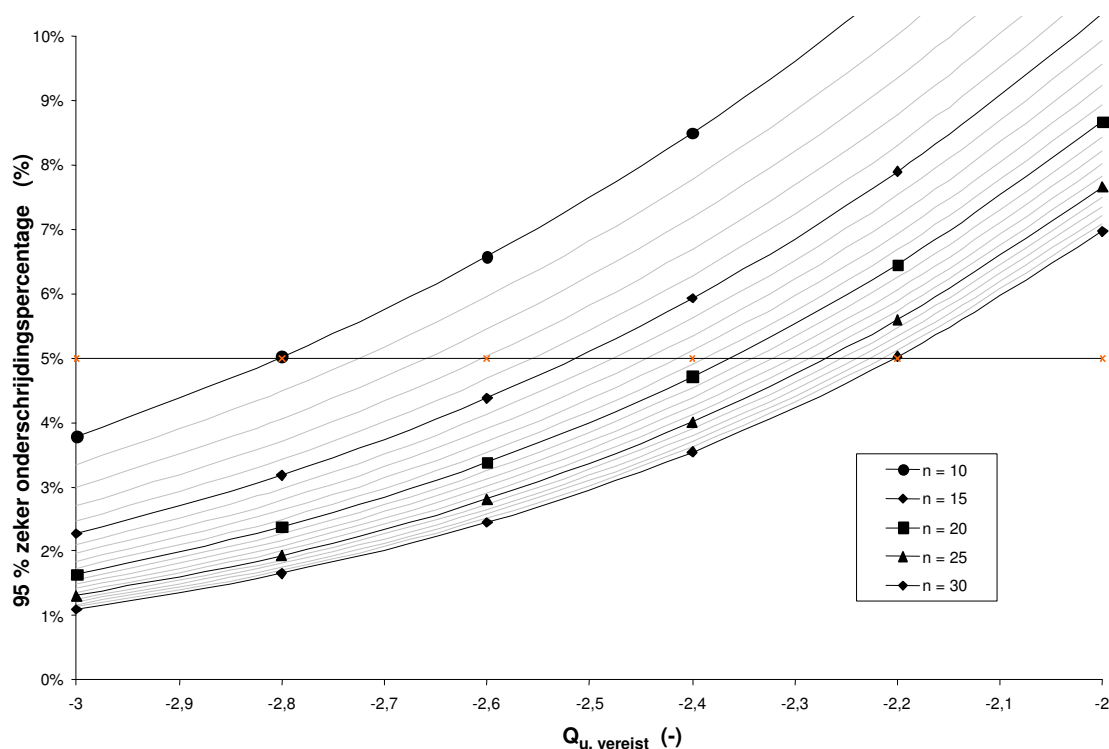
- de asfaltdikte over niet meer dan 5,0 % van het wegvak 20 mm of meer dunner zijn dan de ontwerp - asfaltdikte.
- de funderingsdikte over niet meer dan 5,0 % van het wegvak 40 mm of meer dunner is dan de funderingsdikte volgens het ontwerp.

De toetsing verloopt als volgt.

Eerst wordt het vereiste relatieve⁵ verschil $Q_{u, \text{vereist}}$ tussen de grenswaarde (= ontwerp-laagdikte – 20 mm, of voor fundering: ontwerp-laagdikte - 40 mm) en het steekproefgemiddelde bepaald als functie van het aantal metingen volgens

$$Q_{u, \text{vereist}} = -1,645 \cdot \frac{1 + \sqrt{1 - \left(1 - \frac{1,645^2}{2 \cdot n}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)}}{\left(1 - \frac{1,645^2}{2 \cdot n}\right)} \quad (\text{A.1})$$

Figuur A.1 geeft de berekening volgens formule (A.1) grafisch weer.



Figuur A.1 Statistische toets laagdikten

⁵ Ten opzichte van de standaardafwijking

Hieruit wordt voor het asfalt een vereiste gemiddelde laagdikte berekend volgens:

$$\text{vereiste gemiddelde asfaltdikte} = (\text{ontwerpasfaltdikte} - 20 \text{ mm}) - Q_{u,\text{vereist}} \cdot \text{standaardafwijking asfaltdikte} \quad (\text{A.2})$$

en voor de fundering een vereiste gemiddelde laagdikte volgens

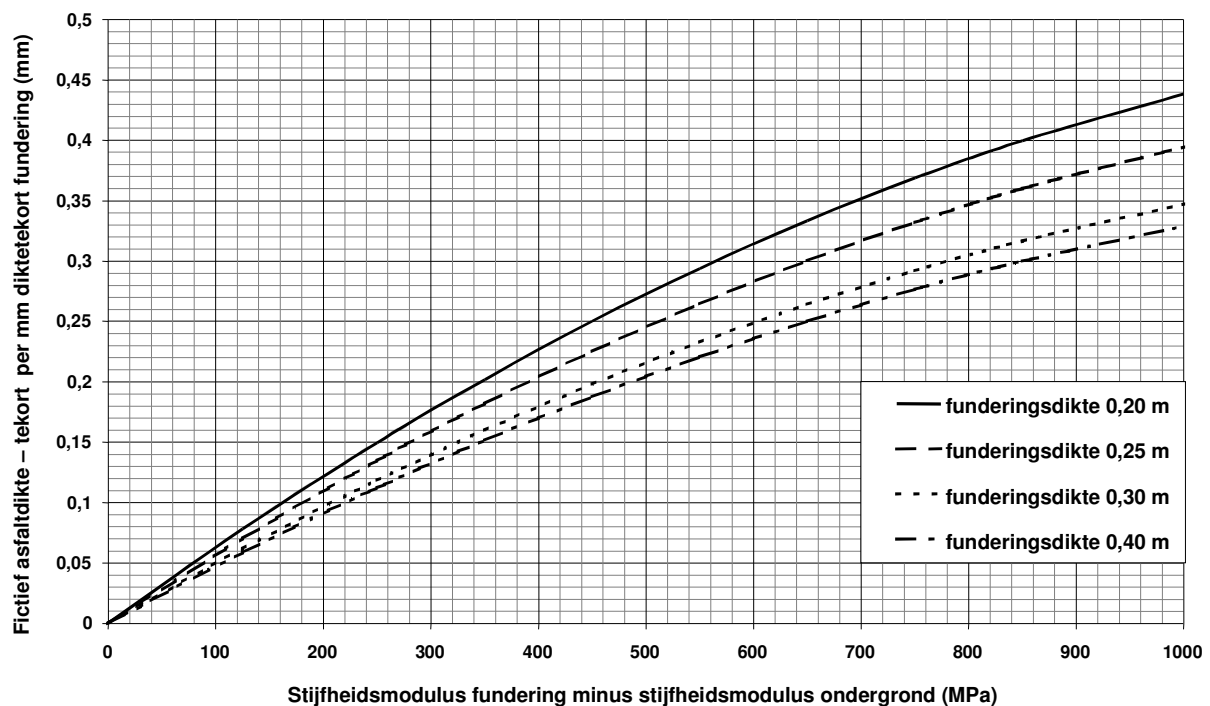
$$\text{vereiste gemiddelde funderingsdikte} = (\text{ontwerp funderingsdikte} - 40 \text{ mm}) - Q_{u,\text{vereist}} \cdot \text{standaardafwijking funderingsdikte} \quad (\text{A.3})$$

Vaststellen van diktetekorten

Indien het gaat om de asfaltdikte, volgt direct een 'werkelijk asfaltdikte – tekort' als het verschil tussen de vereiste gemiddelde asfaltdikte volgens formule A.2 en de gemiddelde asfaltdikte volgens de boorkernen. Een negatief tekort mag hierbij worden opgevat als een asfaltdikte - overschot.

Indien het gaat om de funderingsdikte, volgt eerst een funderingsdiktetekort als het verschil tussen de vereiste gemiddelde funderingsdikte volgens formule A.3 en de gemiddeld gemeten funderingsdikte.

Dit funderingsdikte - tekort wordt omgerekend naar een 'equivalent asfaltdikte – tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' volgens de methodiek van de asfaltdikte – reducties uit de Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen [3]. Deze omwerking is afhankelijk van het verschil tussen de stijfheidsmodulus van de fundering en die van de ondergrond, alsmede van de dikte van de fundering. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de verwachte stijfheidsmoduli volgens hoofdstuk 5. In figuur A.2 is dit uitgewerkt. Een negatief tekort mag hierbij niet worden opgevat als een asfaltdikte - overschot.



Figuur A.2 Omwerking van tekort aan funderingsdikte naar fictief asfaltdikte - tekort

Het is bij deze analyses toegestaan om de hoogst gemeten asfalt- of funderingsdikte buiten beschouwing te laten indien deze op basis van appendix E als afwijkende waarde kan worden beschouwd (Grubbs' test).

Rekenvoorbeelden

Rekenvoorbeeld 1: laagdikte asfalt:

Stel dat de ontwerpasfaltdikte 200 mm bedraagt. De uit 16 boorkernen bepaalde gemiddelde dikte bedraagt 205 mm; de standaardafwijking bedraagt 12 mm. Gevonden wordt met formule (A.1) dat $Q_{u, \text{vereist}}$ de waarde -2,47 heeft. Uit formule (A.2) volgt vervolgens dat de vereiste gemiddelde asfaltdikte $(200 \text{ mm} - 20 \text{ mm}) + 2,47 * 12 \text{ mm} = 210 \text{ mm}$ bedraagt. Er is dus een 'werkelijk asfaltdikte – tekort' dat $210 \text{ mm} - 205 \text{ mm} = 5 \text{ mm}$ bedraagt.

Rekenvoorbeeld 2: laagdikte fundering:

Stel dat de ontwerpfuneringsdikte 250 mm bedraagt. De uit 16 boorkernen bepaalde gemiddelde dikte bedraagt 270 mm; de standaardafwijking bedraagt 25 mm. Gevonden wordt met formule (A.1) dat $Q_{u, \text{vereist}}$ de waarde -2,47 heeft. Uit formule (A.3) volgt vervolgens dat de vereiste gemiddelde funderingsdikte $(250 \text{ mm} - 40 \text{ mm}) + 2,47 * 25 \text{ mm} = 272 \text{ mm}$ bedraagt.

Er is dus een gering funderingsdikte - tekort van $272 \text{ mm} - 270 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$. Dit tekort moet nog omgewerkt worden tot een equivalent asfaltdikte - tekort.

Stel dat de verharding is ontworpen met een asfaltstijfheid van 6000 MPa, een funderingsstijfheid van 600 MPa en een ondergrondstijfheid van 150 MPa. De laagdikte van het asfalt volgens het ontwerp bedraagt 0.20 m en de laagdikte van de fundering volgens het ontwerp 0.25 m. Volgens figuur A.2 bedraagt het 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' (afgelezen bij een verschil van 450 MPa tussen de stijfheidsmodulus van de fundering en die van de ondergrond, en een funderingsdikte van 0,25 m) dan 0,23 mm per mm funderingsdikte - tekort. Bij het funderingsdikte – tekort van 2 mm is het 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende funderingsdikte' dus (na afronding op hele millimeters) $0,23 * 2 \text{ mm} = 0 \text{ mm}$.

Appendix B Verhogen benodigde stijfheidsmodulus fundering wegens onvoldoende ondergrondstijfheid

De teruggerekende ondergrondmodulus dient te worden vergeleken met de in het ontwerp gehanteerde ondergrondmodulus. Indien de teruggerekende ondergrondmodulus te laag is, moet ter compensatie de in het ontwerp gebruikte funderingsstijfheid worden verhoogd. De extra stijfheid die nodig is voor de funderingslaag kan worden bepaald met behulp van onderstaande formule⁶:

$$\Delta E_{fund} = E_{fund} \cdot \left(1,187 \cdot \left(\frac{E_{asf}}{E_{fund}} \right)^{0,0934} + 4,336 \cdot h_{asf}^{0,0536} - 0,0006011 \cdot \left(\frac{E_{fund}}{E_{ond}} \right)^{1,365} - 4,067 \cdot h_{fund}^{0,0702} - 0,970 \right)^5 \cdot \frac{\Delta E_{ond}}{E_{ond}} \quad (B.1)$$

waarin

ΔE_{fund} = benodigde extra stijfheidsmodulus funderingslaag t.o.v de waarde gehanteerd in het ontwerp (MPa)

ΔE_{ond} = tekort aan stijfheidsmodulus ondergrond t.o.v. de waarde gehanteerd in het ontwerp (MPa)

E_{asf} = stijfheidsmodulus asfaltpakket volgens ontwerp (MPa)

E_{fund} = stijfheidsmodulus fundering volgens ontwerp (MPa)

E_{ond} = stijfheidsmodulus ondergrond volgens ontwerp (MPa)

h_{asf} = dikte asfaltpakket volgens ontwerp (m)

h_{fund} = dikte asfaltpakket volgens ontwerp (m)

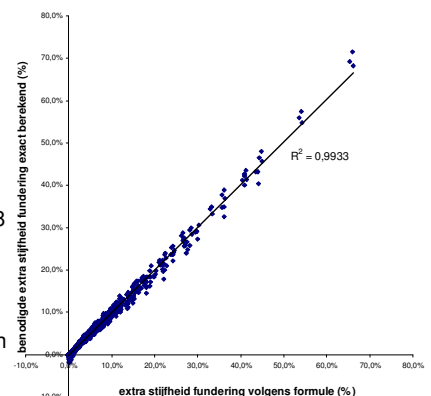
Rekenvoorbeeld:

Stel dat de verharding is onworpen met een asfaltstijfheidsmodulus van 6000 MPa, een funderingsstijfheid van 600 MPa en een ondergrondstijfheid van 150 MPa. De laagdikte van het asfalt volgens het ontwerp bedraagt 0.20 m en de laagdikte van de fundering 0.25 m. Uit de deflectiemeting blijkt de ondergrondstijfheid slechts 120 MPa te zijn, een verschil van 30 MPa. Uitwerking van bovenstaande formule geeft dat deze verkeerde aanname gecompenseerd kan worden als de funderingsstijfheid tenminste $\Delta E_{fund} = 600 \cdot 0,299 \cdot 30/150 = 36$ MPa hoger uitvalt dan aangenomen in het ontwerp. De benodigde funderingsstijfheid wordt dus minimaal 636 MPa.

⁶ Formule (B.1) is afgeleid op grond van een groot aantal lineair elastische meerlagen-berekeningen en is geldig voor:

- stijfheidsmodulus asfalt tussen 5000 MPa en 10000 MPa
- laagdikte asfalt tussen 0,10 m en 0,30 m
- stijfheidsmodulus fundering tussen 200 MPa en 1400 MPa
- laagdikte fundering tussen 0,20 m en 0,40 m
- stijfheidsmodulus ondergrond tussen 50 MPa en 150 MPa.

Hierbij is per combinatie de kritieke rek onder in het asfalt berekend onder een standaard dubbellucht belasting (zie Handleiding Wegenbouw, Ontwerp Verhardingen, 4^e editie, 1998 [3]). Vervolgens is de ondergrondstijfheid verlaagd tot 90%, 80% en 70% waarna de funderingsstijfheid zodanig is opgevoerd dat weer dezelfde rek werd berekend. Op de resultaten is formule A.1 gefit. De regressiecoëfficiënt R^2 bedraagt 0,9933 (zie figuur hiernaast). Indien de ontwerpuitgangspunten buiten bovengenoemde grenzen liggen of indien asfaltrek niet het maatgevende ontwerpcriterium is, kan in plaats van de formule een berekening worden uitgevoerd conform bovengenoemde berekeningsgang.



Appendix C Vaststellen equivalent asfaltdikte – tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli

Indien niet wordt voldaan aan de in hoofdstuk 7 gestelde eisen aan de stijfheidsmoduli van de constructielagen, wordt een 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli' berekend volgens onderstaande procedure.

Uitgegaan wordt van de shiftfactor voor de asfaltstijfheid die wordt teruggerekend met een stijfheidsmodulus van de fundering over het subvak die is vastgezet op de verwachte waarde (zonodig gecorrigeerd voor een te lage stijfheidsmodulus van de ondergrond in het subvak, zie par. 7.1). Uit deze shiftfactor en de ontwerpasfaltdikte wordt een 'equivalent asfaltdikte - tekort wegens onvoldoende stijfheidsmoduli' berekend volgens

$$\text{equivalent asfaltdikte} - \text{tekort} = \text{ontwerpasfaltdikte} \cdot \frac{1 - \sqrt[3]{\text{shiftfactor asfaltstijfheid}}}{\sqrt[3]{\text{shiftfactor asfaltstijfheid}}} \quad (\text{C.1})$$

Appendix D Bepaling samengestelde stijfheidsmodulus

Voor het pakket n lagen met n verschillende stijfheidsmoduli E_i en laagdikten h_i wordt een samengestelde stijfheidsmodulus E_{eq} bepaald die in combinatie met de totale laagdikte h_t van het gehele pakket ($h_t = \sum h_i$), dezelfde buigstijfheid oplevert. Hiertoe wordt eerst de ligging van de neutrale lijn z_t ten opzichte van de onderzijde van het pakket bepaald volgens:

$$z_t = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot z_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot h_i} \quad (D.1)$$

waarin

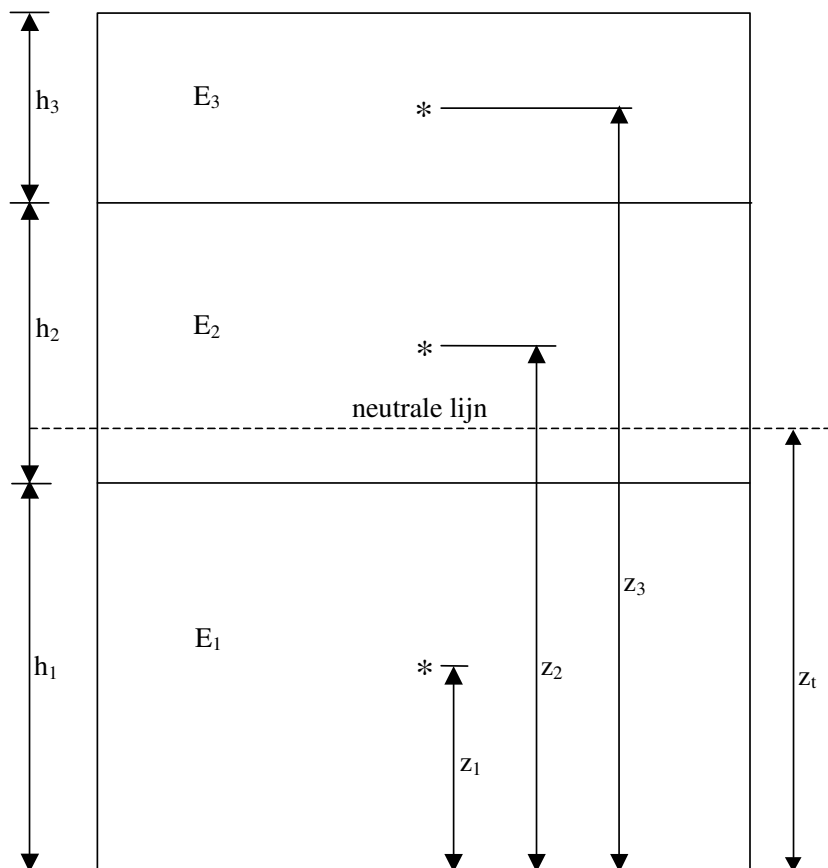
E_i = stijfheidsmodulus laag i (MPa)

h_i = dikte laag i (m)

z_i = afstand van onderkant lagenpakket tot midden laag i (m)

n = aantal lagen (-)

z_t = afstand van onderkant lagenpakket tot neutrale lijn samengestelde lagenpakket (m)



Figuur D.1 Bepaling samengestelde stijfheidsmodulus lagenpakket

Vervolgens wordt de buigstijfheid EI per m' breedte van de gehele samengestelde doorsnede berekend uit:

$$EI = E_1 \cdot \left\{ \frac{1}{12} \cdot h_t^3 + h_t \cdot \left(z_t - \frac{1}{2} \cdot h_t \right)^2 + \sum_{i=2}^n \left(\frac{E_i - E_1}{E_1} \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot h_i^3 + h_i \cdot (z_i - z_t)^2 \right) \right) \right\} \quad (D.2)$$

waarin

EI = buigstijfheid per m' breedte van de gehele samengestelde doorsnede ($MPa \cdot m^4/m$)

E_1 = stijfheidsmodulus onderste laag (MPa)

h_t = dikte totale lagenpakket ($h_t = \sum h_i$)

z_t = afstand van onderkant lagenpakket tot neutrale lijn samengestelde lagenpakket (m)

E_i = stijfheidsmodulus laag i (MPa)

h_i = dikte laag i (m)

z_i = afstand van onderkant lagenpakket tot midden laag i (m)

n = aantal lagen (-)

Tenslotte wordt de samengestelde stijfheidsmodulus E_{eq} van het gehele lagenpakket berekend uit:

$$E_{eq} = \frac{12 \cdot EI}{h_t^3} \quad (D.3)$$

waarin

E_{eq} = samengestelde stijfheidsmodulus van het gehele lagenpakket, die bij dezelfde totale dikte dezelfde buigstijfheid oplevert (MPa)

EI = buigstijfheid per m' breedte van de gehele samengestelde doorsnede ($MPa \cdot m^4/m$)

h_t = dikte totale lagenpakket ($h_t = \sum h_i$)

Rekenvoorbeeld

Voor het testen van eventuele spreadsheets wordt in tabel een rekenvoorbeeld gegeven voor een asfaltpakket bestaande uit 4 lagen:

Tabel D.1 Rekenvoorbeeld samengestelde stijfheidsmodulus

	Dikte (m)	Stijfheidsmodulus (Mpa)
Deklaag	0,04	3800
Tussenlaag	0,06	5000
Onderlaag	0,07	7400
Onderlaag	0,09	7900
Totale dikte	0,26	
Hoogte neutrale lijn z_t	0,11316181	
Buigstijfheid EI per m'	8,39422832	
Samengestelde stijfheidsmodulus E_{eq}	5731,1527	

Appendix E Grubbs' test op afwijkende waarde

Om te bepalen of de hoogste waarde uit een steekproef als afwijkende waarde kan worden beschouwd wordt de volgende procedure doorlopen.

Bereken de zogenaamde Grubbs' statistic G als

$$G = \frac{\text{grootste waarde} - \text{gemiddelde waarde}}{\text{standaardafwijking}} \quad (\text{E.1})$$

Indien G groter is dan de in tabel E.1 gegeven toetswaarde mag de grootste waarde als afwijkende waarde worden beschouwd.

Tabel E.1 Toetswaarden voor Grubbs' test op afwijkende waarde (5% waarschijnlijkheid)

aantal waarden	toetswaarde
3	1,155
4	1,481
5	1,715
6	1,887
7	2,020
8	2,126
9	2,215
10	2,290
11	2,355
12	2,412
13	2,462
14	2,507
15	2,549
16	2,585
17	2,620
18	2,651
19	2,681
20	2,709
21	2,733
22	2,758
23	2,781
24	2,802
25	2,822
26	2,841
27	2,859
28	2,876
29	2,893
30	2,908
31	2,924
32	2,938
33	2,952
34	2,965
35	2,979
36	2,991
37	3,003
38	3,014
39	3,025
40	3,036

Appendix F Definities statistische begrippen

Voor de in deze toetsingsprocedure gebruikte statistische begrippen worden de volgende definities gebruikt:

Gemiddelde

Onder het gemiddelde wordt in deze procedure het rekenkundig gemiddelde verstaan dat wordt berekend volgens

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{F.1})$$

waarin

$\bar{x}$	=	rekenkundig gemiddelde van grootheid x
x_i	=	waarde van grootheid x bij waarneming i ($i = 1$ t/m n)
n	=	aantal waarnemingen

Standaardafwijking

De standaardafwijking wordt berekend volgens

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{F.2})$$

waarin

s	=	standaardafwijking van grootheid x
x_i	=	waarde van grootheid x bij waarneming i ($i = 1$ t/m n)
$\bar{x}$	=	rekenkundig gemiddelde van grootheid x (zie formule E.1)
n	=	aantal waarnemingen

Variatiecoëfficiënt

De variatiecoëfficiënt wordt verkregen door de standaardafwijking s te delen door het rekenkundig gemiddelde $\bar{x}$. Het resultaat wordt uitgedrukt in %.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (\text{F.3})$$

waarin

CV	=	variatiecoëfficiënt van grootheid x (%)
s	=	standaardafwijking van grootheid x (zie formule E.2)
$\bar{x}$	=	rekenkundig gemiddelde van grootheid x (zie formule E.1)