

Opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak

M-876

December 1999

**Rapport aan Amsterdam Airport Schiphol in het kader
van het project "Baangebruik onder natte
omstandigheden *Deel 2*"**

**ir. J.R. van der Heijden
ir. R.A.A. Wijnen
ir. P.R. Vos
Technische Universiteit Delft
Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek
Leerstoel Prestatieleer**

Samenvatting

In 1999 is door de *Technische Universiteit Delft* in opdracht van *Amsterdam Airport Schiphol (AAS)* het project *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 2* uitgevoerd. Tijdens dit project is onder andere onderzoek verricht naar de ontwikkeling van een objectief criterium waarmee de conditie van een baan op AAS onder natte omstandigheden beoordeeld kan worden zonder een operationele meting uit te voeren. Hierbij is onder andere gekeken naar de opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak als gevolg van neerslag, aangezien de dikte van de waterlaag op een start- en landingsbaan mede de stroefheid van de start- en landingsbaan bepaalt. Een start- en landingsbaan is een voorbeeld van een verhardingsoppervlak.

Met behulp van het baanconditie model uit *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 1* (1998) zou een oordeel gegeven kunnen worden over de stroefheid van de baan onder natte omstandigheden. Een onderdeel van *Deel 2* van het project is om na te gaan of en in hoeverre het tijdens *Deel 1* ontwikkelde baanconditie model in de praktijk toepasbaar is. In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de bevindingen betreffende de waterlaagdikte op een verhardingsoppervlak.

Informatie in de publicatie *Water op de weg* van de *stichting Studie Centrum Wegenbouw* (lit.2), alsmede contact met de *Subfaculteit der Civiele Techniek* en de *Dienst Weg- en Waterbouwkunde* van *Rijkswaterstaat*, hebben nieuw inzicht opgeleverd over opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak. Hieruit bleek dat er een aantal belangrijke verschillen bestaan tussen het model dat is ontwikkeld tijdens *Deel 1* en in het verleden ontwikkelde modellen voor de opbouw en afvoer van een waterlaag.

Om meer inzicht te krijgen in de opbouw en afvoer van de waterlaag op de banen van AAS is door *WL Delft Hydraulics*, in opdracht van AAS, een fysisch onderzoek uitgevoerd op een proefstuk met de geometrie en toplaag van de banen op AAS.

Inhoud

SAMENVATTING	i
1. INLEIDING	1
2. OPBOUW EN AFVOER VAN EEN WATERLAAG	2
2.1 INLEIDING	2
2.2 QUANTIFICERING VAN DE WATERLAAGDIKTE	2
2.3 FILTERWET VAN DARCY	7
2.4 LABORATORIUMPROEF DOOR RIJKSWATERSTAAT	7
3. SECUNDAIRE EFFECTEN	8
3.1 DE AANWEZIGHEID VAN RIJSPOREN	8
3.2 DE VERKEERSINTENSITEIT EN -SAMENSTELLING	8
3.3 DE WIND	8
3.4 MARKERINGEN	11
3.5 VERDAMPING	11
4. FYSISCH ONDERZOEK TER VERIFICATIE VAN DE WATERLAAGDIKTE	13
4.1 INLEIDING	13
4.2 EERSTE IDEEËN	13
4.3 FYSISCH ONDERZOEK WATERLAAGDIKTE DOOR WL DELFT HYDRAULICS	16
5. CONCLUSIES	19
LITERATUUR	20

1. Inleiding

In 1999 is door de *Technische Universiteit Delft* in opdracht van *Amsterdam Airport Schiphol (AAS)* het project *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 2* uitgevoerd. Tijdens dit project is onder andere onderzoek verricht naar de ontwikkeling van een objectief criterium waarmee de conditie van een baan op AAS onder natte omstandigheden beoordeeld kan worden zonder een operationele meting uit te voeren. Hierbij is onder andere gekeken naar de opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak als gevolg van neerslag, aangezien de dikte van de waterlaag op een start- en landingsbaan mede de stroefheid van de start- en landingsbaan bepaalt. Een start- en landingsbaan is een voorbeeld van een verhardingsoppervlak.

In *Deel 1* van het project *Baangebruik onder natte omstandigheden*, lit. 1, is verondersteld dat de hoogte H van de waterlaag op de baan afhankelijk is van:

- De neerslagintensiteit;
- De tijd;
- De afwateringscapaciteit van de baan.

Met behulp van het zogenaamde baanconditie model uit *Deel 1* zou een oordeel gegeven kunnen worden over de stroefheid van de baan onder natte omstandigheden. Een onderdeel van *Deel 2* van het project is om na te gaan of en in hoeverre het tijdens *Deel 1* ontwikkelde baanconditie model in de praktijk toepasbaar is. In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de bevindingen betreffende de waterlaagdikte op een verhardingsoppervlak.

In hoofdstuk 2 wordt de opbouw en de afvoer van een waterlaag besproken. De secundaire verschijnselen die effect hebben op de waterlaag worden in hoofdstuk 3 behandeld. De mogelijkheden voor en de uitvoer van een praktijk- of laboratoriumproef zijn te vinden in hoofdstuk 4. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies gegeven.

Een aantal onderdelen in dit rapport zijn tevens terug te vinden in het eindrapport van het project *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 2* (lit. 6).

2. Opbouw en afvoer van een waterlaag

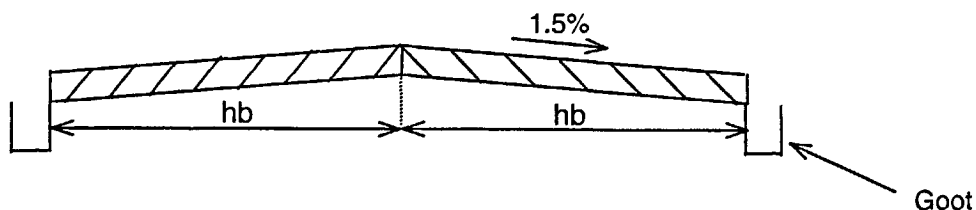
In *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 2* is de Technische Universiteit Delft (TUD) een onderzoek gestart naar de mogelijkheden om een experiment uit te voeren, hetzij in een laboratoriumsituatie, hetzij op de werkelijke banen van *Amsterdam Airport Schiphol (AAS)*, om de uitdrukkingen opgesteld in *Deel 1* te verifiëren. Bij het opstellen van het baanconditie model in *Deel 1* zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd die geverifieerd en uitgewerkt dienen te worden voordat dit baanconditie model in de praktijk toepasbaar is:

- De waterlaagdikte is bij benadering constant over de breedte van de baan;
- De afwateringscapaciteit van de banen varieert met de hoogte van de waterlaagdikte op de baan. Hoe meer water er op de baan ligt, hoe meer er per tijdseenheid aan de zijkant af zal stromen.

Tijdens dit onderzoek, *Deel 2*, heeft onder andere een gesprek plaatsgevonden met prof. dr. ir. A.A.A. Molenaar van de sectie *Verkeersbouwkunde* van de *Subfaculteit der Civiele Techniek* over de verschillende aspecten van het baanconditie model en de mogelijkheden om een experiment uit te voeren ter verificatie van het tijdens *Deel 1* ontwikkelde model. Tijdens dit gesprek bleek dat er in het verleden reeds onderzoek is verricht naar de opbouw van een waterlaag op asfalt en naar de afvoer van zo'n waterlaag. Dit onderzoek is onder andere verricht door de *Dienst Weg- en Waterbouwkunde* van *Rijkswaterstaat*. Het rapport *Water op de weg* van ir. A.G. Welleman (lit. 2), een publikatie van de stichting *Studie Centrum Wegenbouw*, beschrijft een deel van dit onderzoek. Bovendien beschrijft dit rapport modellen die in het verleden opgesteld zijn om de dikte van de waterlaag die zich tijdens een regenbui op een vlakke verharding vormt te quantificeren. De informatie in deze publikatie die van belang is voor de verificatie van de afwateringscapaciteit van de banen op AAS wordt in dit hoofdstuk besproken.

2.1 Inleiding

Eenvoudig gesteld zit het afwateringssysteem van een baan op AAS als volgt in elkaar. De banen lopen vanuit het midden naar de zijkanten af met een hellingspercentage van 1.5%. Water dat zich op en in de textuur van de baan bevindt zal daarom afstromen naar de zijkant van de baan. Daar bevindt zich een goot waar het afgestroomde water door wordt afgevoerd. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.1. In deze figuur staat *hb* voor *halve baanbreedte*.



Figuur 2.1 Geschematiseerde dwarsdoorsnede van een baan op AAS.

2.2 Quantificering van de waterlaagdikte

Volgens lit. 2 zal zich op een zeker punt op een verhardingsoppervlak, zoals een landingsbaan, bij een zekere regenintensiteit een zekere constante waterlaagdikte instellen. De belangrijkste invloedsfactoren ten aanzien van deze waterlaagdikte zijn:

- *De regenintensiteit.*
Hoe harder het regent, hoe dikker de waterlaag;

- *De dwars- en langshelling van het verhardingsoppervlak.*
Naarmate de resultante van dwars- en langshelling groter is kan het water sneller over het oppervlak naar de berm of goot stromen en zal de laagdikte kleiner zijn;
- *De aanstroamlengte.*
Naarmate de afstand waarover water naar een punt van het verhardingsoppervlak toestroomt groter is zal de waterlaag ter plaatse van dat punt dikker zijn. De aanstroamlengte hangt onder andere af van de langs- en dwarshelling van de baan. Indien aangenomen wordt dat de banen op AAS geen langshelling hebben wordt de aanstroamlengte tot een punt op de baan in dit geval gegeven door de kortste afstand van dit punt tot het midden van de baan;
- *De ruwheid van de verharding.*
Als maat voor deze ruwheid wordt meestal de textuurdiepte gebruikt.

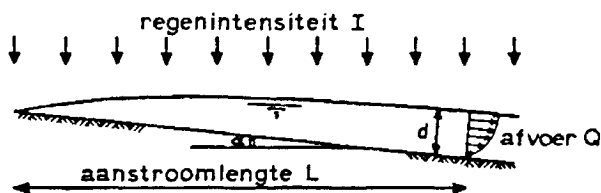
Bij constante regenintensiteit zal op een zeker punt op het verhardingsoppervlak evenwicht ontstaan tussen de aangevoerde en de afgevoerde hoeveelheid water op dit punt. Het evenwicht dat ontstaat kan worden uitgedrukt met de volgende vergelijking:

$$L \cdot I \cdot \cos \alpha = q = d \cdot \bar{v}_w \quad (2.1)$$

Hierin zijn:

L	aanstroamlengte
I	regenintensiteit
α	hellingshoek van het verhardingsoppervlak
d	waterlaagdikte
\bar{v}_w	gemiddelde stroomsnelheid
q	hoeveelheid af te voeren regenwater per tijdseenheid

Deze begrippen worden tevens verduidelijkt in figuur 2.2. De gemiddelde stroomsnelheid is onder andere een functie van de gemiddelde helling van het oppervlak.



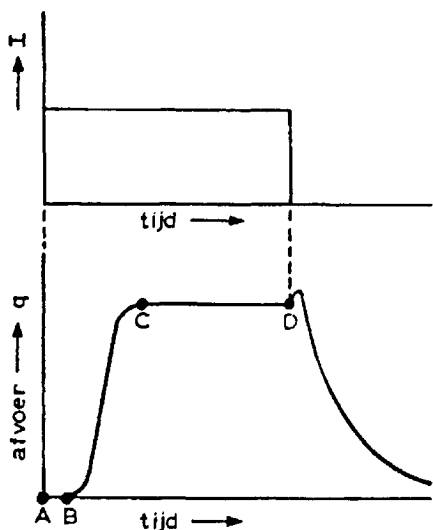
Figuur 2.2 Verloop waterlaagdikte over de breedte van de baan bij constante regenintensiteit.
Bron: lit.2

Een algemene basisvergelijking voor de waterlaagdikte is:

$$d = k \frac{(L \cdot I)^m}{p^n} \quad (2.2)$$

Hierin zijn k , m en n constanten die langs empirische weg bepaald worden. Hierop wordt later teruggekomen. De factor p is het hellingspercentage van de baan.

Volgens lit. 2 zal het evenwicht tussen de aangevoerde hoeveelheid water $I \cdot L$ en de afgevoerde hoeveelheid water q zich binnen enige minuten instellen. Dit kan nader geïllustreerd worden aan de hand van figuur 2.3.



Figuur 2.3 Verloop afwateringscapaciteit bij constante regencapaciteit
Bron: lit.2

In figuur 2.3 geeft het bovenste deel de constante regenintensiteit I aan, als functie van de tijd. Het onderste deel geeft het verloop van de in een bepaald punt op het verhardingsoppervlak afgevoerde hoeveelheid water q aan, ook als functie van de tijd. Als het begint te regenen (punt A) wordt eerst een hoeveelheid water opgenomen door en/of geborgen tussen de oneffenheden van het verhardingsoppervlak. Na enige tijd begint de afvoer van het water op gang te komen (punt B). Na een zekere periode ontstaat er evenwicht tussen de aangevoerde hoeveelheid water $I \cdot L$ en de afgevoerde hoeveelheid q (punt C). De periode AC kan twee tot vier minuten duren. Na deze periode zullen in dit punt, totdat het stopt met regenen, de waterafvoer en de waterlaagdikte constant blijven. Nadat het gestopt is met regenen (punt D) zal de afvoer van het water eerst heel even toenemen, als gevolg van het wegvallen van de weerstand van de vallende druppels, om vervolgens geleidelijk af te nemen. De afvoer van het water neemt dus af bij een afnemende waterlaagdikte, zoals reeds was voorspeld in *Deel 1*.

Een belangrijke constatering is dat zich volgens lit. 2 bij constante regenintensiteit op een zeker punt op een verhardingsoppervlak binnen een paar minuten een constante waterlaagdikte zal instellen. Deze waterlaagdikte varieert over de breedte van het oppervlak. Dit in tegenstelling tot de in *Deel 1* opgestelde uitdrukking voor het verloop van de waterlaagdikte op basis waarvan de waterlaagdikte bij constante regenintensiteit gedurende aanzienlijk langere tijd zal toenemen dan de twee tot vier minuten waarbinnen zich volgens lit. 2 in elk punt van de baan een constante laagdikte zal instellen. Bovendien is in het in *Deel 1* opgestelde model voor de opbouw van de waterlaagdikte geen variatie van de laagdikte over de breedte van de baan verondersteld.

In lit. 2 worden een aantal onderzoeken genoemd waarin is getracht de constanten k , m en n uit uitdrukking 2.2 te bepalen. Deze onderzoeken zijn onafhankelijk van elkaar uitgevoerd door de heren Höcker, Kalender en Gallaway e.a.. De uitdrukking voor de waterlaagdikte voortkomend uit het onderzoek van Höcker levert over het algemeen de hoogste waterlaagdiktes op, de uitdrukking voortkomend uit het onderzoek van Kalender de laagste.

Omdat de methode van Kalender de grootste waterlaagdiktes voorspelt, en dus het meest conservatief is, zou gekozen kunnen worden voor het hanteren van deze methode in het baanconditie model. Kalender heeft echter vier vergelijkingen voor het verloop van waterlaagdikte opgesteld. Welke vergelijking in een concrete situatie moet worden toegepast hangt af van de regenintensiteit, de helling van het oppervlak en de ruwheid van het oppervlak. Een factor die het kiezen van een van de

vergelijkingen nog verder bemoeilijkt is het feit dat tijdens de tests geen werkelijke oppervlakken zijn gebruikt maar modeloppervlakken bestaande uit korrels met gelijke dikte. Modeloppervlakken komen in de praktijk nauwelijks voor. Bovendien heeft hij geen ruwheden (textuurdiepten) groter dan 1 mm gebruikt, terwijl ruwheden groter dan 1 mm wel voorkomen op AAS.

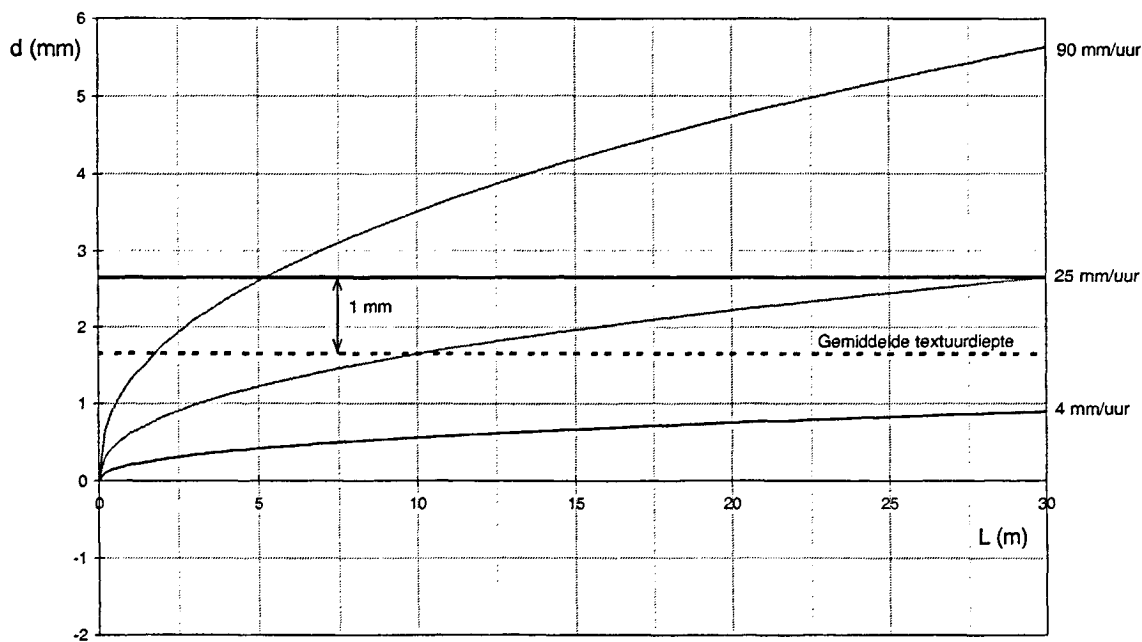
De resultaten van Gallaway en zijn groep lijken het meest bruikbaar te zijn. Hun uitwerking van uitdrukking 2.2 is het eenvoudigst toepasbaar. Bovendien hebben zij bij proefnemingen de praktijk-situatie het best benaderd, onder andere ten aanzien van de structuur en afmetingen van de gebruikte proefstukken. Bij een hellingspercentage van 2% en een textuurdiepte van 2 mm, waarden die redelijk in de buurt komen van de situatie op AAS, komen de resultaten van Gallaway en Höcker bovendien redelijk overeen. Dit geldt zeker voor grotere aanstroomb lengten. De door Gallaway e.a. gevonden uitdrukking is:

$$d = 1.487 \times 10^{-2} \times TD^{0.11} \times L^{0.43} \times I^{0.59} \times \left(\frac{1}{S}\right)^{0.42} \quad (2.3)$$

Hierin zijn:

- d waterlaagdikte vanaf een afstand met de waarde van de gemiddelde textuurdiepte onder de toppen van de textuur (mm)
- I regenintensiteit (mm/uur)
- L aanstroomb lengte (m)
- S helling van het verhardingsoppervlak (m/m)
- TD gemiddelde textuurdiepte (mm)

Hoewel Gallaway zijn proeven slechts heeft uitgevoerd tot een aanstroomb lengte van 9 m lijkt extrapolatie van zijn resultaten toch tot plausibele resultaten te leiden. Figuur 2.4 geeft het verloop van de waterlaagdikte met de aanstroomb lengte volgens het Gallaway model voor de situatie zoals deze zich op AAS voordoet, dat wil zeggen voor een hellingspercentage van 1.5% en een gemiddelde textuurdiepte van 1.65 mm.



Figuur 2.4 Verloop van de waterlaagdikte met de aanstroomb lengte bij verschillende waarden voor de regenintensiteit.

Wanneer een halve baanbreedte van 30 m aangenomen wordt zal bij 4 mm neerslag per uur de waterlaagdikte niet boven de toppen van de textuur uitkomen. Bij 25 mm neerslag per uur zal de waterlaagdikte op de rand van de baan ongeveer 1 mm bedragen. Bij 90 mm neerslag per uur zal de waterlaagdikte op ongeveer 5.5 m, de halve wielbasis van een Boeing 747-400, uit het midden van de baan 1 mm bedragen. Wanneer uitgegaan wordt van een gemiddelde textuurdiepte van 1.0 mm zal de waterlaagdikte bij 4 mm/uur opnieuw niet boven de toppen van de textuur uitkomen. Een waterlaagdikte van 1 mm op de rand van de baan treedt op bij 17.5 mm/uur, terwijl een regenintensiteit van ongeveer 60 mm/uur resulteert in een waterlaag van 1 mm op 5.5 m van de baan.

Een volledige verificatie van de uitkomsten van uitdrukking 2.3 heeft tot nu toe niet plaatsgevonden. Incidentele waarnemingen van stroomlijnen en waterlaagdiktes kwamen echter goed overeen met de resultaten van de in lit. 2 aangegeven methoden voor het berekenen van de aanstroamlengte en de waterlaagdikte.

Samenvattend kan gesteld worden dat in deze paragraaf een model voor de opbouw van de waterlaag op een verhardingsoppervlak beschreven is dat op een aantal punten belangrijke verschillen vertoont met het in *Deel 1* opgestelde model voor de waterlaagdikte. Deze verschillen zijn:

- De waterlaagdikte neemt bij constante regenintensiteit niet gedurende langere tijd toe, maar bereikt binnen twee tot vier minuten een constante waarde. Dit in tegenstelling tot het in *Deel 1* opgestelde model voor het verloop van de waterlaagdikte waarbij de waterlaagdikte bij constante regenintensiteit gedurende aanzienlijk langere tijd, enige uren, bleef toenemen;
- De onderzoeker Gallaway heeft een praktische uitdrukking ontwikkeld voor de waterlaagdikte op een verhardingsoppervlak. Deze uitdrukking is afhankelijk van de plaats op de baan, de textuurdiepte, de regenintensiteit en de hellingshoek van de baan. De uitdrukking is niet afhankelijk van de tijd, aangezien de waterlaagdikte binnen enkele minuten een stationaire waarde bereikt. De waterlaagdikte die zich volgens de uitdrukking van Gallaway in zal stellen is over het algemeen lager dan door het model uit *Deel 1* voorspeld wordt;
- De waterlaagdikte is niet constant over de breedte van de baan, maar neemt toe naarmate de aanstroamlengte (afstand tot het midden van de baan) groter is.

Deze informatie is van belang bij het uitvoeren van een proef ter verificatie van de afwateringscapaciteit. Hierop wordt verder ingegaan in hoofdstuk 4.

Overigens staan in lit. 2 verder een aantal proeven beschreven, waarin de stroefheid van verschillende verhardingsoppervlakken bij verschillende waterlaagdiktes en snelheden met behulp van een meetvoertuig is bepaald. Een van de interessantste resultaten van deze proeven is dat een waterlaagdikte van meer dan 2 à 3 mm nauwelijks meer invloed heeft op de stroefheid. Maatregelen ter verhoging van de veiligheid onder natte omstandigheden zijn dus alleen effectief als de waterlaagdikte onder deze waarden ligt (of door de maatregelen gebracht wordt). Verder bleek dat de stroefheid zelfs kan toenemen bij hogere waterlaagdiktes. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat de hydrodynamische krachten toenemen. Deze treden echter op tussen band en waterfilm en kunnen niet worden aangewend om een koersverandering te bewerkstelligen. Een toename van deze krachten levert dus geenszins een veiliger situatie op. Overigens dient opgemerkt te worden dat bij een waterlaagdikte van 2 à 3 mm wel gevaar voor aquaplaning kan ontstaan.

Het effect van bijvoorbeeld wind en andere verschijnselen op de waterlaag wordt in hoofdstuk 3 behandeld.

2.3 Filterwet van Darcy

In lit. 2 wordt de filterwet van *Darcy* genoemd. Deze beschrijft de hoeveelheid water die door een materiaal per eenheid van tijd afgevoerd kan worden indien de laag geheel gevuld is met water. Deze wet luidt:

$$Q = k S A \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (2.4)$$

Hierin zijn:

Q	hoeveelheid afgevoerd water per tijdseenheid [m ³ /s]
k	doorlatendheidscoëfficiënt k [m/s]
S	helling van de baan [m/m]
A	het oppervlak van de afvoerende doorsnede [m ²]

De doorlatendheidscoëfficiënt k is een indicator voor de mate waarin een vloeistof door een materiaal kan stromen en is afhankelijk van de vloeistof en het materiaal waar de vloeistof doorheen stroomt. In lit. 2 wordt een voorbeeld gegeven voor ZOAB. Gesteld wordt dat de doorsnede van één strekkende meter van dit materiaal 0.04 m² bedraagt. Indien de doorlatendheidscoëfficiënt van ZOAB geschat wordt op $1 \cdot 10^{-2}$ m/s geldt voor een stuk weg onder een dwarshelling van 2.5% dat per strekkende meter $1 \cdot 10^{-5}$ m³ water per seconde wordt afgevoerd. Voor een stuk weg van 10 meter breed betekent dit dat een bui met een neerslagintensiteit van 3.6 mm per uur geheel afgevoerd kan worden zonder dat zich een waterlaag op de toppen van de textuur vormt. De ZOAB laag heeft een dikte van 4 cm waarvan 12.4% bergend vermogen is. Indien tijdens de duur van de regenbui van 3.6 mm/uur dus niet meer dan 5 mm (12.4% van 4 cm) extra water valt (bijvoorbeeld door intensivering van de regenbui) zal zich dus nog steeds geen laag op de toppen van de textuur vormen.

Indien de doorlatendheidscoëfficiënt voor de Possehl Anti-Skid, hetgeen op de banen van AAS ligt, laag bepaald kan worden kan de wet van *Darcy* mogelijk gebruikt worden om de afwateringscapaciteit van de banen op AAS te bepalen. Nadeel van deze wet is dat geen indicatie verkregen wordt over de waterlaagdikte die zich bovenop de toppen van de textuur vormt bij grotere regenintensiteiten.

2.4 Laboratoriumproef door Rijkswaterstaat

In 1975 is door het *Rijkswegenbouwlaboratorium (RWL)*, tegenwoordig *de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW)*, een proef uitgevoerd in het *Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie* van de *Landbouwniversiteit van Wageningen* gehouden. Het doel van deze proef was om de eigenschappen van ZOAB met betrekking tot de afvoer van water te bepalen. Hiertoe is een opstelling gemaakt met een laag ZOAB van 12 bij 1 meter. Deze laag kon ingesteld worden onder verschillende hellingshoeken. Met behulp van een beregeningsinstallatie konden buien met verschillende regenintensiteiten worden gesimuleerd.

Contact met personen van *Rijkswaterstaat* en het *Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie* van de *Landbouwniversiteit van Wageningen* heeft geleerd dat het onderzoek voornamelijk bedoeld was om het verschil tussen waterlaagdiktes bij verschillende neerslagintensiteiten en hellingshoeken te bepalen, niet zozeer om een nauwkeurige voorspelling van de dikte van de waterlaag te kunnen doen. De resultaten van deze proef zijn weliswaar in een rekenmodel verwerkt, maar dit model is niet meer operationeel. Het apparaat waarmee de waterlaagdikte is gemeten is nog wel beschikbaar bij *DWW*. Tenslotte was de beregeningsinstallatie niet aangekocht, maar door het *Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie* zelf ontworpen.

3. Secundaire effecten

De primaire factoren die de dikte van de waterlaag op de baan bepalen zijn de neerslagintensiteit en de afwateringscapaciteit van de baan. De invloed van deze factoren is behandeld in hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op een aantal secundaire verschijnselen die van invloed kunnen zijn op de waterlaagdikte op de baan.

3.1 De aanwezigheid van rijsporen

Afhankelijk van de dwarshelling van het verhardingsoppervlak ter plaatse kan de waterlaagdikte in een rijspoor een veelvoud zijn van de dikte op een vlak wegdek. Omdat de banen op AAS aan vlakheidseisen moeten voldoen en omdat volgens AAS geen plasvorming op de banen optreedt mag worden aangenomen dat rijsporen op AAS niet van noemenswaardige invloed zijn op de dikte van de waterlaag op de baan. Indien onverhoopt toch rijsporen aanwezig zijn, hebben deze volgens lit. 2 bij de dwarshelling op AAS nauwelijks invloed op de waterlaagdikte tot een rijspoordiepte van 5 mm. Bij grotere diepte neemt de invloed echter snel toe.

3.2 De verkeersintensiteit en -samenstelling

Naarmate de verkeersintensiteiten hoger zijn zal de hoeveelheid water die van het wegdek wordt verwijderd door opspatting en verstuiwing groter zijn. Dit zal ook voor de banen op AAS het geval zijn. Tevens zal bij startende en landende vliegtuigen het effect op kunnen treden dat een natte baan door de straal uit de motoren deels wordt 'droog geblazen'. Beide effecten zijn moeilijk te quantificeren, maar aangenomen mag worden dat de effecten positief zullen zijn in die zin dat zij een kleinere waterlaagdikte zullen veroorzaken.

3.3 De wind

Afhankelijk van richting en sterkte kan de wind zowel een gunstige als een ongunstige invloed hebben op de waterlaagdikte. Als een harde wind in een richting waait die pal tegenovergesteld is aan de afstromingsrichting van het op het wegdek aanwezige water kunnen plaatselijk ongunstig afwijkende waterlaagdiktes voorkomen.

Een van de weinige onderzoeken naar de invloed van de wind op de dikte van een waterlaag is gedaan door de Duitse onderzoeker Petraczek en wordt beschreven in lit. 3. Bij dit onderzoek is alleen gekeken naar de invloed van de wind met een windrichting die tegengesteld is aan de afstroming van het water. Het oppervlak van het proefstuk dat gebruikt is tijdens het onderzoek bestaat uit plensasfalt met een korrelgrootte van 8 mm dat zodanig opgevuld is met kwartzand dat een gesloten egaal oppervlak wordt bereikt. Op deze manier kan alleen de invloed van de wind en de regendruppels bepaald worden. De waterlaagdikte boven de gesloten oppervlaktestructuur onder invloed van wind en regen kan volgens Petraczek worden uitgedrukt aan de hand van drietal factoren. In formulevorm:

$$d_{RM} = f_w \cdot f_R \cdot d_0 \quad (3.1)$$

Hierin zijn: d_{RM} waterlaagdikte onder invloed van wind en regen
 f_w invloedsfactor van de wind
 f_R invloedsfactor van de regen (energie van de regendruppels)
 d_0 ongestoorde waterlaagdikte

De volgende formules zijn door Petraczek afgeleid om bovenstaande factoren te bepalen:

$$f_W = \frac{1.2274^{W \cdot k} \cdot 0.951}{(I \cdot L)^{0.06 \cdot W \cdot k}} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} f_R &= 1 & I < 6 \text{ mm/uur} \\ f_R &= 1.066 I^{0.1277} & I > 6 \text{ mm/uur} \end{aligned} \quad (3.3a \text{ en } b)$$

$$d_0 = 0.01214 \frac{(I \cdot L)^{1/3}}{p^{1/3}} \text{ (cm)} \quad (3.4)$$

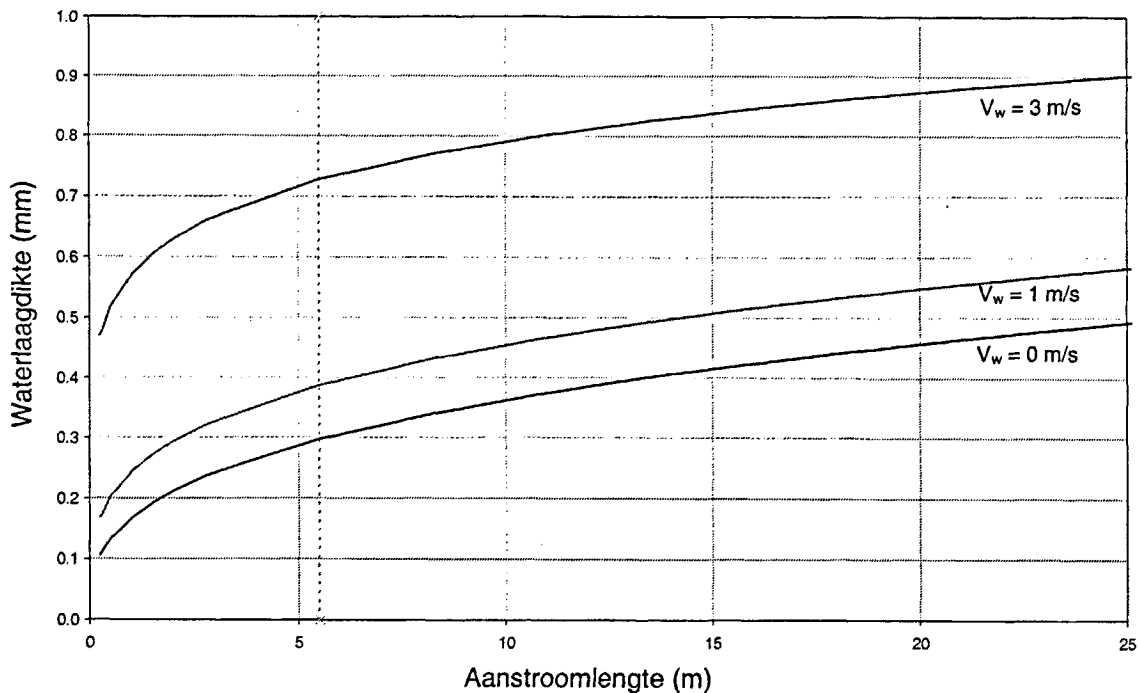
Hierin zijn: W windsnelheid (m/s)
 I regenintensiteit (cm/uur)
 L aanstroomlengte (m)
 p helling (%)
 $k = 2.64\sqrt{p} + 0.742$

Bovenstaande formules gelden bij een maximale windsnelheid van 3 m/s.

Wanneer het onderzoek van Petraczek geprojecteerd wordt op de situatie op AAS kan de door Petraczek onderzochte waterlaag op een egaal gesloten oppervlak vergeleken worden met een waterlaag op AAS boven de toppen van de textuur. In hoofdstuk 4 van lit. 6 wordt vermeld dat stroefheidsgegevens waarmee in dit rapport gewerkt wordt vergelijkbaar zijn met stroefheidswaarden die optreden bij een waterlaagdikte als gevolg van natuurlijke regenval tot de toppen van de textuur en mogelijk net iets daarboven. Hierbij wordt een indicatief getal van 0.3 mm waterlaagdikte genoemd. In eerste instantie wordt hieronder uiteengezet wat volgens Petraczek de invloed van de wind is op een waterlaagje van 0.3 mm op 5.5 meter van de baan, ofwel bij een aanstroomlengte van 5.5 meter (de locatie van meetsectie 1 in het experiment van *WL Delft Hydraulics*, zie hoofdstuk 4.3).

Wanneer bovenstaande formules toegepast worden voor de dwarsstelling van de banen van AAS dan blijkt in de situatie zonder dwarswind een waterlaagdikte $d_0 = 0.3$ mm op 5.5 m aanstroomlengte op te treden bij een regenintensiteit $I = 0.4$ mm/uur. Dit blijkt ook uit figuur 3.1, waarin de waterlaagdikte is uitgezet als functie van de aanstroomlengte voor verschillende windsnelheden. Uit deze figuur blijkt dat volgens Petraczek de waterlaagdikte bij een windsnelheid van 1 m/s (1.94 kts) toeneemt met ongeveer 0.09 mm tot bijna 0.4 mm. Verder blijkt dat de toename van 0.09 mm vrijwel constant blijft met de aanstroomlengte. Bij een windsnelheid van 3 m/s (5.83 kts) blijkt de toename iets meer dan 0.4 mm te bedragen zodat een waterlaagdikte van iets meer dan 0.7 mm ontstaat. Ook de toename van 0.4 mm blijft vrijwel constant met de aanstroomlengte. Geconcludeerd kan worden dat dwarswind de waterlaagdikte op een glad oppervlak sterk kan verhogen en dat dit effect toeneemt met toenemende dwarswind.

Gepoogd is ook de invloed van de wind bij kleinere waterlaagdikten te bekijken. De benodigde regenintensiteit om een waterlaagdikte van 0.1 mm op 5.5 meter uit de baan te creëren bleek volgens Petraczek ongeveer 0.015 mm/uur te bedragen, met andere woorden ruim 6.5 maal kleiner dan de gecreëerde waterlaagdikte. Uit het fysisch onderzoek van *WL Delft Hydraulics*, zie lit. 7, blijkt dat voor de banen op AAS inderdaad een veel grotere neerslagintensiteit nodig is om een waterlaagdikte van 0.1 mm op de baan te creëren. Omdat de regenintensiteit ook gebruikt wordt om de invloed van de wind op de waterlaagdikte te bepalen werd dit uitgangspunt niet plausibel geacht. Daarom is de invloed van de wind bij een waterlaagdikte van 0.1 mm niet verder onderzocht.



Figuur 3.1 Invloed van de wind op de waterlaagdikte voor verschillende windsnelheden. Ongestoorde waterlaagdikte d_0 op 5.5 m uit de baan is 0.3 mm.

De volgende opmerkingen kunnen worden gemaakt bij het onderzoek van Petraczek:

- De maximale windsnelheid waarvoor formule 3.1 geldig is, is 3 m/s. Dit komt overeen met 5.8 kt. Over de invloed van de wind bij hogere snelheden wordt geen uitspraak gedaan;
- De opstuwing ten gevolge van wind hangt zeer sterk af van de neerslagintensiteit. Hoe harder het regent des te minder invloed heeft de wind. Bovenstaande berekening is gedaan bij een neerslagintensiteit van 0.4 mm/uur. Dit komt door het feit dat het in Petraczek's onderzoek gebruikte oppervlak geen textuurdiepte kent. In de praktijk zal de neerslagintensiteit die op AAS een waterlaag van 0.3 mm boven de toppen van de textuur veroorzaakt aanzienlijk groter zijn dan 0.4 mm/uur, zoals ook blijkt uit het door *WL Delft Hydraulics*, lit 7, verrichtte onderzoek. Bij een neerslagintensiteit van minder dan 6 mm/uur wordt de invloed van de wind daarom volgens de methode van Petraczek overschat. Bij een neerslagintensiteit van meer dan 6 mm/uur is dit niet noodzakelijkerwijs het geval aangezien de regendruppels dan het effect van de wind vergroten en dit effect neemt toe met de neerslagintensiteit;
- In de formules van Petraczek wordt de invloed van de rand van de baan niet meegenomen. Ook aan de rand van de baan zal nog een grote windinvloed gevonden worden, hoewel de hoeveelheid beschikbaar water om deze opstuwing te bewerkstelligen richting de rand van de baan steeds minder wordt. Het is onduidelijk in hoeverre de uitkomsten van Petraczek door dit effect beïnvloed worden;
- Onduidelijk is hoe de windsnelheid aan het oppervlak is bepaald. Bij een laminair windprofiel neemt de windsnelheid toe vanaf het verhardingsoppervlak. Indien de wind dus op enige afstand van het oppervlak gemeten is, en indien er geen nadere bewerkingen op uitgevoerd zijn, zal in de praktijk aan het oppervlak een lagere snelheid voorkomen. De KNMI windmetingen op vliegvelden gebeuren op 10 meter hoogte volgens ICAO voorschrift, om deze grenslaag invloeden te vermijden;

- Er is tijdens het onderzoek alleen gekeken naar de wind die tegengesteld is aan de afstroomrichting, met andere woorden, naar pure dwarswind. Pure dwarswind komt in de praktijk bijna nooit voor. De wind is meestal te ontbinden in een component dwars op de baan en een component in de richting van de baan. Om de werkelijke invloed van de wind te bepalen zal ook de invloed van deze langskomponent meegenomen moeten worden.

Verwacht wordt dat de invloed van de wind zeer gering zal zijn zolang het water onder de toppen van de textuur staat. De structuur schermt het water af en houdt het water als het ware vast. Ook verlaagt de structuur de snelheid van de wind. Uit het bovenstaande blijkt echter dat de invloed van de wind aanzienlijk kan zijn als er een waterlaag boven de toppen van de textuur ontstaat. Uit het onderzoek van *WL Delft Hydraulics*, zie lit. 7, is gebleken dat de waterlaag bij lage regenintensiteiten niet boven de toppen van de textuur uitkomt. Zolang deze lage regenintensiteiten bepalend zijn voor de dwarswindcriteria kan de invloed van de wind op de waterlaagdikte verwaarloosd worden. Nader onderzoek zal nodig zijn om de invloed bij hoge neerslagintensiteiten exact te bepalen voor de situatie op AAS.

3.4 Markeringen

Achter markeringen kunnen bij regen plassen ontstaan met ter plaatse ongunstig dikke waterlagen. Volgens visueel onderzoek van AAS ontstaan er geen plassen achter markeringen. De invloed van markeringen op de banen van AAS zijn dus verwaarloosbaar. Mochten er eventueel wel plassen ontstaan dan kan hiermee rekening gehouden worden door andere windcriteria te hanteren.

3.5 Verdamping

Het bepalen van verdamping is niet eenvoudig. Een groot aantal factoren bepaalt de verdamping op een oppervlak, waarvan de eigenschappen van het oppervlak, de temperatuur van de lucht en het oppervlak, de luchtvochtigheid en de wind er slechts enkele zijn. Er is op dit moment nog geen formule bekend die goed toepasbaar is op verschillende situaties. In lit. 4 worden onder andere methoden beschreven voor het berekenen van de verdamping van open water, begroeide oppervlakken en nat gewas oppervlakken. Deze methoden zijn relatief gecompliceerd. Een methode voor het berekenen van verdamping op asfalt is niet gevonden.

De mate van verdamping kan sterk variëren door het jaar heen. Ter illustratie wordt een tweetal voorbeelden gegeven. Met behulp van een rekenmethode van *Makkink* (lit. 5) heeft het KNMI bepaald dat op een oppervlak begroeid met een bepaald referentiegewas ongeveer 540 mm per jaar verdampt. De verdamping per maand varieert hierbij van 8 mm in januari tot ongeveer 90 mm in juli. Een verdamping van 8 mm per maand zou neerkomen op ongeveer 0.27 mm per dag. Op open water kan de verdamping op een zeer warme, zonnige winderige dag, dus onder optimale omstandigheden voor verdamping, 7 mm bedragen.

Geadviseerd wordt om de invloed van verdamping in het baanconditie model te verwaarlozen en wel om de volgende redenen:

- *Geen model voor asfalt e.d. beschikbaar.*
Voor zover bekend is er geen model bekend om de verdamping op een ondergrond als een landingsbaan te bepalen;
- *Constante waterlaagdikte.*
Tijdens een regenbui met constante intensiteit zal het verdampende water waarschijnlijk continu aangevuld worden tot de evenwichtswaarde. Tijdens een regenbui zal verdamping dus nauwelijks invloed hebben. Bovendien zal de hoge luchtvochtigheid tijdens een regenbui de verdampende

hoeveelheid water hoogstwaarschijnlijk doen afnemen. Wel kan verdamping invloed hebben op de afname van de waterlaagdikte na afloop van de regenbui;

- *Nauwkeurigheid voorspelling is onvoldoende*

Op basis van informatie in lit. 4 over de nauwkeurigheid van het bepalen van de factoren die invloed hebben op verdamping wordt betwijfeld of de invloed van verdamping met voldoende nauwkeurigheid in het baanconditie model meegenomen kan worden.

De verdamping zal eveneens sterk variëren door het jaar heen. Een nauwkeurig model voor berekening van de verdamping op een landingsbaan is niet beschikbaar en het aantal invloedsfactoren op verdamping is groot. Bovendien kan de invloed van verdamping onder bepaalde omstandigheden gering zijn. Om de voorspelling van het baanconditie model conservatief te houden en niet onnodig gecompliceerd te maken wordt geadviseerd deze factor niet in het model te betrekken.

4. Fysisch onderzoek ter verificatie van de waterlaagdikte

4.1 Inleiding

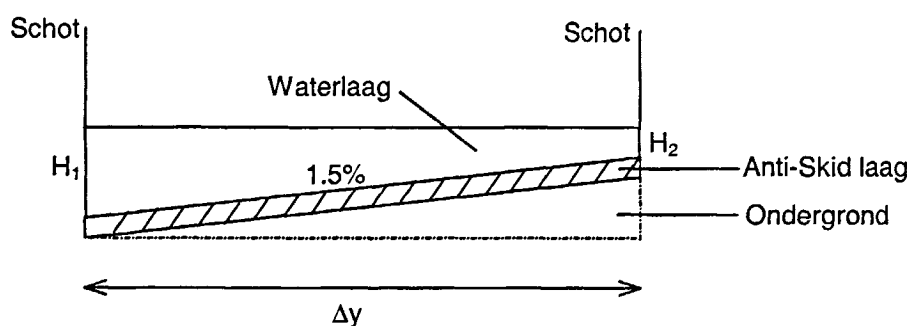
In de voorgaande twee hoofdstukken is informatie gepresenteerd over de opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak die nog niet bekend was ten tijde van *Deel 1*. Deze informatie is gebruikt voor het eventueel opzetten van een proef ter verificatie van de afwateringscapaciteit op de banen van AAS. Uiteindelijk is besloten om door *WL Delft Hydraulics* een fysisch onderzoek te laten uitvoeren om de relatie te bepalen tussen de waterlaagdikte en de regenintensiteit. In dit hoofdstuk worden een aantal ideeën voor het uitvoeren van een praktijkproef gegeven en vervolgens wordt de praktijkproef beschreven die uitgevoerd is door *WL Delft Hydraulics* om de waterlaagdikte op een proefstuk van de banen van AAS te bepalen.

4.2 Eerste ideeën

De eerste ideeën zijn gegenereerd in het begin van het onderzoek. Dit betekent dat sommige ideeën nog gebaseerd zijn op oude veronderstellingen.

Om de waterlaagdikte op een baan van AAS te bepalen dient een waterlaag aangebracht te worden. Bij een praktijkproef kan de waterlaag op de baan aangebracht te worden door middel van een (gesimuleerde) regenbui. Als de regenintensiteit en de waterlaagdikte beide gemeten kunnen worden kan er een relatie bepaald worden tussen de regenintensiteit en de waterlaagdikte.

Als de waterlaagdikte moeilijk te meten is het mogelijk om de hoeveelheid afgevoerde water op te vangen zodat met behulp van de relatie tussen de waterlaagdikte en het opvangen water de waterlaagdikte bepaald kan worden. Tijdens het onderzoek is ook gedacht aan het aanbrengen van een statische waterlaag op een afgesloten stuk baan op de manier zoals weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1 Aanbrengen van een statische waterlaag op een afgesloten stuk baan.

Na het verwijderen van het schot aan de rand van de baan zal het water gaan stromen. Eenvoudig gesteld zou door het opvangen van het afgestroomde water een beeld verkregen kunnen worden van de afwateringscapaciteit van de baan. Een probleem wat zich hierbij voordoet is dat de statische waterlaag nooit dezelfde vorm zal hebben als de waterlaag die zich zal instellen tijdens een regenbui, waarbij het water continu gelijkmatig over de hele baanoppervlak aangevoerd zal worden. Tevens was ten tijde van deze gedachtengang nog niet bekend dat de waterlaagdikte niet constant is op een verhardingsoppervlak. Dit betekent dat het lastig is om dan de waterlaagdikte over de breedte te bepalen. Het hellingspercentage van de banen op AAS van 1.5% betekent dat het hoogteverschil

tussen de waterlaag aan de rand van de baan (H1) en op het hoogste punt van het onderzochte baandeel (H2) 1.5% van de breedte Δy van het onderzochte baangedeelte zal bedragen. Op een halve baanbreedte van 30 m betekent dit een hoogteverschil van 45 cm. Op een proefstuk van 0.5 x 0.5 m betekent dit dat het hoogteverschil nog altijd 7.5 mm zal bedragen. Dit zijn veelvouden van de waterlaagdikte van 1 mm waar het in dit onderzoek uiteindelijk om draait. Metingen met behulp van een statische waterlaag zullen dus geen resultaten van de gewenste nauwkeurigheid opleveren.

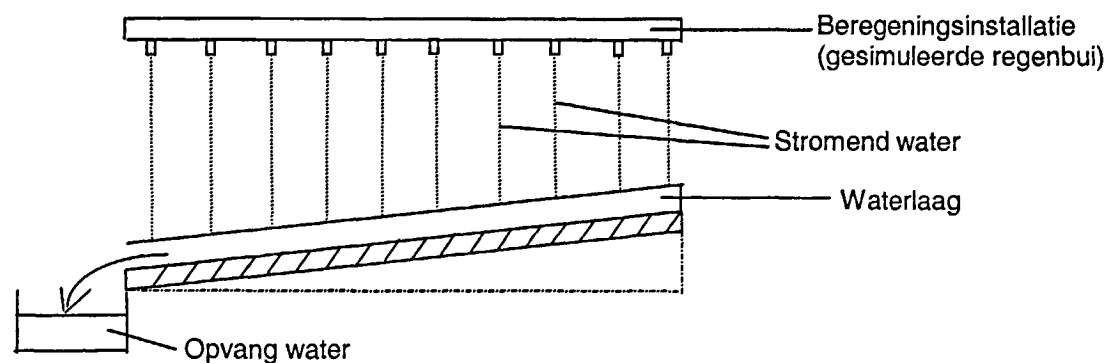
Om de werkelijkheid tijdens de praktijkproef zoveel mogelijk te benaderen dient de waterlaag op de baan dus aangebracht te worden door middel van een (gesimuleerde) regenbui. Dit kan een werkelijke regenbui zijn, maar ook een simulatie door middel van een beregeningsinstallatie. Aan het uitvoeren van de proef bij een werkelijke regenbui kleven een aantal nadelen:

- Er kan geen invloed uitgeoefend worden op de intensiteit en de duur van de bui en het tijdstip waarop deze optreedt. Dit zal de duur van de proef verlengen ten opzichte van een gesimuleerde regenbui, waardoor meer beslag gelegd wordt op manuren en operationele beschikbaarheid van banen.
- De intensiteit kan tijdens een bui aanzienlijk variëren. Tenzij deze variatie nauwkeurig gemeten kan worden levert dit onnauwkeurigheden op in de tijdens de proef bepaalde relatie tussen neerslagintensiteit en waterlaagdikte.

Voor het simuleren van een regenbui dient een beregeningsinstallatie aangelegd te worden. Om een voldoende nauwkeurig verband tussen de waterlaagdikte en de intensiteit van de bui te kunnen bepalen moet de installatie in ieder geval aan de volgende eisen voldoen:

- De intensiteit van de gesimuleerde regenbui moet bekend zijn en gevarieerd kunnen worden.
- De verdeling van het water over het onderzochte baanoppervlak moet voldoende gelijkmatig zijn.

Het tijdens *Deel 1* opgestelde model voor de opbouw van de waterlaag en de afwateringscapaciteit kon in principe geverifieerd worden met de opstelling weergegeven in figuur 4.2. Uit een beregeningsinstallatie boven een proefstuk stroomt water over het gehele oppervlak van het proefstuk. Dit proefstuk kan een deel van de werkelijke baan op AAS zijn, maar ook een proefstuk in een laboratorium. Hierdoor vormt zich een waterlaag op het proefstuk. In *Deel 1* is aangenomen dat de dikte van deze waterlaag vrijwel gelijk is over het gehele oppervlak van het proefstuk. Door de helling van het proefstuk zal het water naar beneden stromen. Wanneer het van het proefstuk af stroomt wordt het opgevangen. Met behulp van de gemeten afgevoerde hoeveelheid water kan dan door middel van de relatie tussen de waterlaagdikte en het opgevangen water de constante waterlaagdikte over de breedte van de baan bepaald worden.



Figuur 4.2 Uitvoering experiment door middel van een gesimuleerde regenbui.

In een laboratoriumsituatie zal het opvangen van het afgestroomde water geen problemen opleveren. Volgens informatie van AAS kan het opvangen van de afgestroomde hoeveelheid water op de banen van AAS zelf echter moeilijkheden opleveren. Dit hangt samen met de constructie van de goten en de afvoer van het water hieruit.

Bekend is dat de firma Possehl een proefstuk kan leveren van 0.5×0.5 m. Dit is echter niet voldoende om te gebruiken in de meetopstellingen in figuur 4.2 en wel om de volgende redenen:

- Uit de informatie in paragraaf 2.2 blijkt dat de waterlaagdikte sterk afhankelijk is van de aanstroamlengte. Met een aanstroamlengte van 0.5 m kan geen reëel beeld verkregen worden van de opbouw van de waterlaagdikte op de banen van AAS;
- Hoogstwaarschijnlijk heeft de waterlaag ook enige afstand nodig om zijn stationaire vorm te bereiken. Op een proefstuk van 0.5 m is het water al weer afgestroomd voor dat de waterlaag zich heeft kunnen instellen;
- Het proefstuk zal tijdens de proef aan de zijkanten afgesloten zijn om afstroming daar te voorkomen. Hierdoor zullen echter wel randverstoringen optreden in de stroming. Het is goed mogelijk dat dit op een proefstuk van slechts 0.5 m breed een significante invloed heeft.

Een andere mogelijkheid is om de doorlatendheidscoëfficiënt k in de wet van *Darcy* van een klein proefstuk of van een van de banen van AAS te bepalen. De doorlatendheidscoëfficiënt is in principe een eigenschap van de combinatie oppervlaktetextuur/stromend medium. De bepaling van de coëfficiënt k is niet zo eenvoudig en vereist nader onderzoek. Voor deze methode is dan ook niet gekozen.

In principe zijn er twee mogelijke locaties om de verificatie uit te voeren, namelijk op een van de banen van *Amsterdam Airport Schiphol* of in een laboratorium. Een proef op AAS biedt de volgende voordelen:

- De situatie benadert het best de werkelijkheid, onder andere wat betreft hellingspercentage, baanafmetingen en baan oppervlak. De afmetingen van het onderzochte stuk baan kunnen bijvoorbeeld zo groot zijn als wenselijk is;
- Er hoeft geen proefstuk gefabriceerd te worden.

Aan een proef op AAS kleven echter ook een aantal nadelen:

- De weersomstandigheden zijn niet controleerbaar. Bij het uitvoeren van de proef met een beregeningsinstallatie zal het bijvoorbeeld droog moeten zijn. Ook zal wind een rol kunnen spelen. Dit betekent dat de proef langer kan duren dan in een laboratoriumsituatie;
- Er wordt beslag gelegd op de operationele beschikbaarheid van de baan;
- De opvang van het afgestroomde water levert problemen op;
- Een deel van de baan dient zodanig afgesloten te kunnen worden dat de afmetingen van het onderzochte baanvak voldoende nauwkeurig vastliggen.

Omdat de nadelen zwaarder wegen dan de voordelen is uiteindelijk besloten om een laboratoriumproef te laten uitvoeren door het Delftse onderzoeksinstituut *WL Delft Hydraulics*.

4.3 Fysisch onderzoek waterlaagdikte door WL Delft Hydraulics

Om nader inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de waterlaag in relatie tot de neerslagintensiteit en neerslagduur op banen met de specifieke kenmerken van de banen op AAS is een fysisch onderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek is uitgevoerd door het Delftse onderzoeksinstituut *WL Delft Hydraulics* in opdracht van AAS. Dit instituut heeft een ruime ervaring met water gerelateerde vraagstukken. Deze paragraaf geeft een beknopte beschrijving van het uitgevoerde onderzoek, alsmede de belangrijkste resultaten. Voor nadere details aangaande het onderzoek wordt verwezen naar lit. 7.

Het gebruikte model bestond uit multiplex platen met daarop dezelfde toplaag als aanwezig op de banen van AAS, zijnde een *anti-skid* laag bestaande uit basaltgruis en teerhoudend bindmiddel, van de Duitse firma *Possehl*. De geometrische kenmerken van het model waren als volgt:

- Lengte: 22.5 m (halve breedte huidige banen AAS);
- Breedte: 0.5 m;
- Hellingpercentage: 1.5% (hellingpercentage huidige banen AAS);
- Gemiddelde textuurdiepte: 2.1 mm.

Het model stond opgesteld in een overdekte ruimte. Een beregeningsinstallatie zorgde voor een constante neerslagintensiteit ter plaatse van de baan. Er zijn vijf proeven uitgevoerd met de volgende kenmerken:

- Constante neerslagintensiteit, uitgevoerd voor 1, 2, 3, 4 en 6 mm (nominaal) neerslag per 15 minuten;
- Berekening gedurende 15 minuten;
- Meting van de waterlaagdikte gedurende de berekening tot ongeveer 45 minuten na afloop van de berekening. Totale meettijd per proef dus ongeveer een uur vanaf het begin van de berekening.

Verder is een combinatieproef uitgevoerd waarbij drie buien met intensiteiten van 3, 2 en 1 mm (nominaal) en een neerslagduur van 15 minuten met tussenpauzen van 5 tot 10 minuten op de baan zijn losgelaten.

De waterlaagdikte is gemeten op twee locaties op de baan:

- 5.5 m vanaf het begin van de helling (meetsectie 1);
- 17.5 m vanaf het begin van de helling (meetsectie 2).

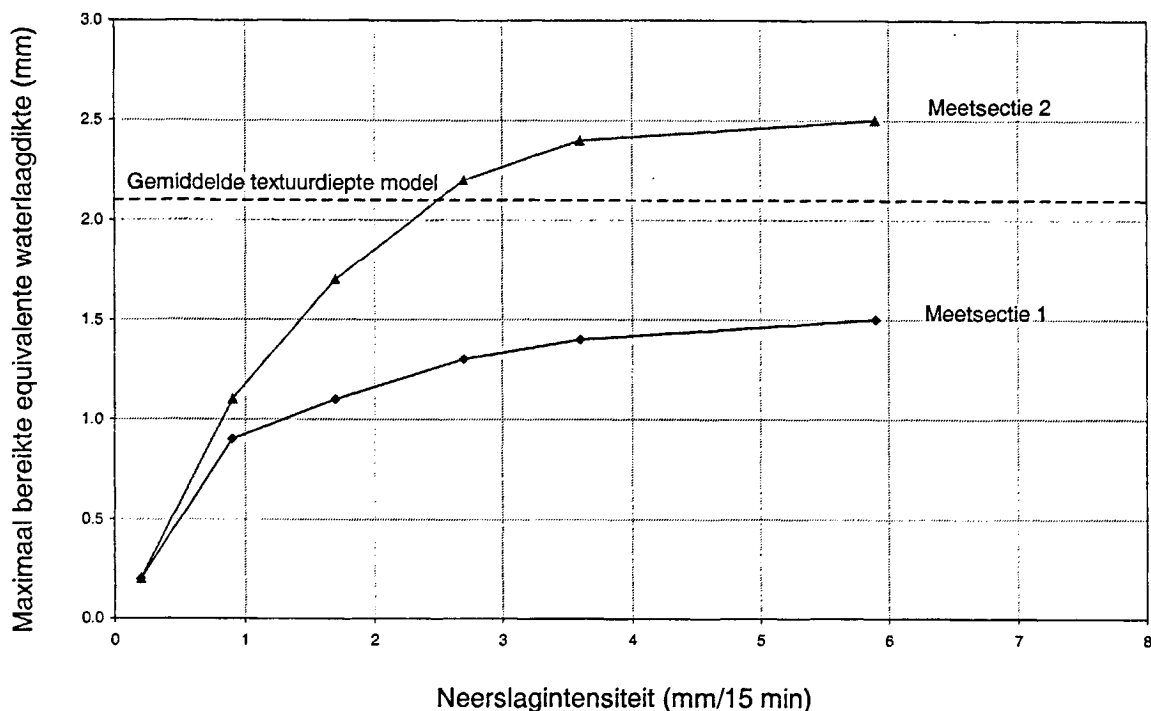
Meting van de waterlaagdikte heeft plaatsgevonden met behulp van de volgende instrumenten in verband met verschillende geschiktheid van de meetmethoden bij verschillende waterlaagdiktes:

- Licht-reflectietechniek;
- Elektrische weerstandsmeettechniek;
- Servo-weegschaal.

De belangrijkste resultaten van de proeven zijn weergegeven in figuur 4.3. Figuur 4.3 geeft de maximale equivalente waterlaagdikte die tijdens de proeven is gemeten ter plaatse van beide meetsecties als functie van de regenintensiteit. Het wordt opgemerkt dat in deze figuur de metingen zijn gecorrigeerd ten aanzien van de regenintensiteit. Uit de stationaire afvoermetingen die zijn uitgevoerd bleek namelijk dat de gerealiseerde regenintensiteit namelijk iets lager waren dan de nominale regenintensiteit. Aan de hand van figuur 4.3 kan het volgende worden geconcludeerd:

- Ter plaatse van meetsectie 1 komt de waterlaagdikte bij alle onderzochte neerslagintensiteiten niet boven de toppen van de textuur van het model uit;

- Ter plaatse van meetsectie 2 komt de waterlaagdikte bij een neerslagintensiteit groter dan 2.5 mm/15 min boven de toppen van de textuur van het model uit;
- De maximale equivalente waterlaagdikte is ter plaatse van meetsectie 1 in alle gevallen lager dan ter plaatse van meetsectie 2.

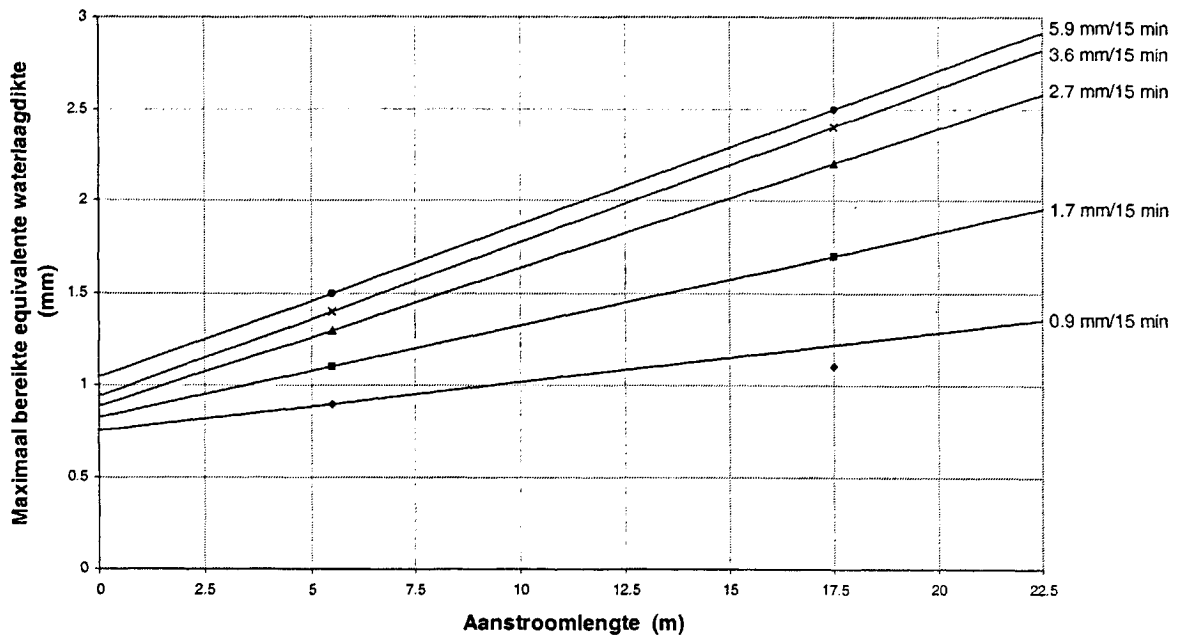


Figuur 4.3 Verloop van de waterlaagdikte met de gecorrigeerde regenintensiteit volgens het fysisch onderzoek van WL Delft Hydraulics. (lit. 7)

Tevens hebben de proeven uitgewezen dat na verloop van tijd, in de meeste gevallen binnen de ingestelde duur van de berekening van 15 minuten, zowel ter plaatse van meetsectie 1 als van meetsectie 2 een stationaire situatie bereikt wordt. Dat wil zeggen dat de waterlaagdikte bij constante neerslagintensiteit niet toeneemt bij langere regenduur. De duur om stationair te worden hangt af van de regenintensiteit. Bij een nominale regenintensiteit van 1 mm per 15 minuten werd ter plaatse van meetsectie 2 geen stationaire situatie bereikt. In dit geval kan de maximaal te bereiken equivalente waterlaagdikte bepaald worden door extrapolatie.

De meetresultaten van de gecombineerde proef, waarbij verschillende regenintensiteiten achter elkaar zijn gezet met kleine tussenpozen er tussen, geven aan dat ook tijdens deze proef de stationaire waterlaagdikte behorende bij de regenintensiteit van de afzonderlijke bui wordt bereikt. De tijd tot aan het bereiken van de stationaire conditie is afhankelijk van de beginconditie van de baan en is bij een natte baan korter dan bij een droge baan.

Tevens is door WL Delft Hydraulics een verband bepaald voor de banen op AAS tussen de aanstroamlengte en de waterlaagdikte afhankelijk van de regenintensiteit. Deze relatie is weergegeven in figuur 4.4. Volgens het onderzoek van WL Delft Hydraulics bestaat er een lineair verband tussen de maximaal bereikte equivalente waterlaagdikte en de aanstroamlengte bij de onderzochte regenintensiteiten. Het meetpunt in sectie 2 bij een nominale regenintensiteit van 1 mm/15 min betreft een niet-stationair punt. Het bijbehorende stationaire punt is via extrapolatie bepaald, waardoor een lineair verband is getrokken.



Figuur 4.4 Maximaal bereikte equivalente waterlaagdikte als functie van de aanstroamlengte.

5. Conclusies

Informatie in de publicatie *Water op de weg* van de stichting *Studie Centrum Wegenbouw* (lit.2), alsmede contact met de *Subfaculteit der Civiele Techniek* en de *Dienst Weg- en Waterbouwkunde* van *Rijkswaterstaat*, hebben nieuw inzicht opgeleverd over opbouw en afvoer van een waterlaag op een verhardingsoppervlak. Hieruit bleek dat er een aantal belangrijke verschillen bestaan tussen het model dat is ontwikkeld tijdens *Deel 1* en in het verleden ontwikkelde modellen voor de opbouw en afvoer van een waterlaag, waarvan een van de best toepasbare het model van Gallaway is. De belangrijkste verschillen zijn:

- De waterlaagdikte neemt bij constante regenintensiteit niet gedurende langere tijd toe, maar bereikt binnen twee tot vier minuten een constante waarde. Dit in tegenstelling tot het in *Deel 1* opgestelde model waarbij de waterlaagdikte bij constante regenintensiteit gedurende aanzienlijk langere tijd, enige uren, blijft toenemen;
- De onderzoeker Gallaway heeft een praktische uitdrukking ontwikkeld voor de waterlaagdikte op een verhardingsoppervlak. Deze uitdrukking is afhankelijk van de plaats op de baan, de textuurdiepte, de regenintensiteit en de hellingshoek van de baan. De uitdrukking is niet afhankelijk van de tijd, aangezien de waterlaagdikte binnen enkele minuten een stationaire waarde bereikt. De waterlaagdikte die zich volgens de uitdrukking van Gallaway in zal stellen is over het algemeen lager dan door het model uit *Deel 1* voorspeld wordt;
- De waterlaagdikte is niet constant over de breedte van de baan, zoals verondersteld in *Deel 1*, maar neemt toe naarmate de aanstroamlengte (afstand tot het midden van de baan) groter is.

Ten aanzien van secundaire effecten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

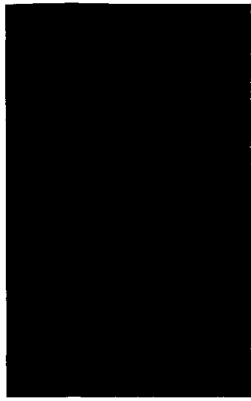
- De effecten van verkeer en verdamping op de waterlaag zullen overwegend positief zijn. Dat wil zeggen dat wordt verwacht dat deze effecten de waterlaag op de baan zullen verlagen. Deze effecten kunnen echter niet voldoende nauwkeurig gekwantificeerd worden om mee te nemen in het baanconditie model;
- Onderzoek van de Duitse onderzoeker *Petraczek* wijst er op dat de invloed van de wind op waterlagen boven de toppen van de textuur op de baan aanzienlijk kan zijn. Verwacht wordt dat de wind weinig invloed zal hebben op de dikte van een waterlaag onder de toppen van de textuur van de baan;
- Vanwege de vlakheidseisen op AAS wordt aangenomen dat het ongunstige effect dat spoorvorming en markerings kunnen hebben op de waterlaagdikte niet optreedt op AAS.

Om meer inzicht te krijgen in de opbouw en afvoer van de waterlaag op de banen van AAS is door *WL Delft Hydraulics* een fysisch onderzoek uitgevoerd op een proefstuk met de geometrie en toplaag van de banen op AAS. Uit dit onderzoek is het volgende naar voren gekomen:

- Na verloop van tijd wordt, in de meeste gevallen (behalve bij een regenintensiteit van 0.9 mm per 15 minuten ter plaatse van meetsectie 2) binnen de ingestelde duur van de berekening van 15 minuten, zowel ter plaatse van meetsectie 1 (5.5 meter vanaf de baanas) als van meetsectie 2 (17.5 meter vanaf de baanas) een stationaire situatie bereikt. Dat wil zeggen dat de waterlaagdikte, nadat de stationaire situatie zich ingesteld heeft, bij constante neerslagintensiteit niet verder toeneemt bij langere regenduur. In het geval dat er geen stationaire situatie werd bereikt binnen 15 minuten is de maximaal te bereiken waterlaagdikte bepaald door extrapolatie;
- Indien het water op 17.5 meter vanaf de as van de baan niet boven de toppen van de textuur uitkomt dan is dit ook niet het geval voor afstanden vanaf de baanas kleiner dan 17.5 meter.

Literatuur

1. Heijden, J.R. van der, Wijnen, R.A.A., Holten, Th. van, *Baangebruik onder natte omstandigheden - Studie voor Amsterdam Airport Schiphol, Airline & Handling Services*, Technische Universiteit Delft, december 1998
2. Welleman, A.G., *Water op de weg*, Stichting Studie Centrum Wegenbouw, september 1977
3. Petraczek, O., *Experimentelle Vermittlung der Wasserfilmdicken af Fahrbahnen unter natürlichen Bedingungen, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 195, 1975
4. Buishand, T.A., Velds, C.A., *Neerslag en verdamping*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 1980
5. <http://www.knmi.nl/voorl/nader/verdamping.htm>
6. Heijden, J.R. van der, Wijnen, R.A.A., Holten, Th. van, Vos, P.R., *Baangebruik onder natte omstandigheden Deel 2 - Studie voor Amsterdam Airport Schiphol, Business Unit Airlines*, Technische Universiteit Delft, oktober 1999
7. Jongeling, T.H.G., *Afwatering landingsbaan – Relatie regenintensiteit en waterlaagdikte*, WL Delft Hydraulics, opdrachtgever: *Amsterdam Airport Schiphol*, september 1999



Memorandum 876



60142021426