



Impact of Blood Droplets

*N. Laan*

## **Popular short abstract**

Within Bloodstain Pattern Analysis, forensic experts commonly use the stringing method, based on a straight line approximation of the blood droplets trajectories to determine where the source of a bloodstain pattern was. However, by ignoring gravity, large errors may arise when inferring the 3D-location of the wound, making it impossible to discern, for example, between a standing and sitting position. To reconstruct the trajectories correctly, the impact velocity of the droplets is required. In this thesis it is shown how this can be done directly from the shape and volume of dried bloodstains. By using advanced fluid dynamics based on a balance of inertial, viscous and capillary forces, it is possible to determine the impact velocity of the bloodstains. Accordingly, the curved trajectory can be calculated by taking gravity into account. Based on real bloodstain impact patterns we show that with our method the location and height of the origin can be determined much more accurate than the current methods in use.

## **Nederlandse Samenvatting**

Bloedspoorpatroonanalyse is een forensische methode die gebruikt wordt om, onder andere, te bepalen waar het bloederige delict heeft plaats gevonden en wat er is gebeurd. Bijvoorbeeld, een forensisch onderzoeker wil bepalen waar het slachtoffer was toen een specifiek patroon gecreëerd werd. Onderzoekers gebruiken een rechte-lijn benadering om te bepalen waar de oorsprong was van het bloed. Daarbij verwaarlozen zij het effect die zwaartekracht en luchtweerstand hebben waardoor de oorsprong altijd te hoog wordt bepaald. De grootte van deze overschatting hangt af van de afstand tussen oorsprong en bloedspoorpatroon. Vanaf een afstand van één meter is het doorgaans niet meer mogelijk om bijvoorbeeld te bepalen of het slachtoffer zich in een zittende of staande houding bevond. Met deze methode is het dus niet mogelijk om te achterhalen wat de exacte positie en houding was van zowel slachtoffer als dader, terwijl deze informatie cruciaal kan zijn om het verschil te maken tussen zelfverdediging of een aanval.

De snelheid waarmee de druppel op de muur is gekomen, is nodig om zwaartekracht en luchtweerstand mee te kunnen nemen in de berekening van de gekromde vliegbaan van die druppel. In deze thesis presenteer ik mijn promotie onderzoek betreffende de dynamiek van impact en spreiding van druppels om de volgende vraag te beantwoorden: Is het mogelijk om de impactsnelheid te bepalen van een bloeddruppel, vanuit de opgedroogde bloedvlek om vervolgens, de gekromde baan te berekenen waar die vandaan kwam?

In hoofdstuk 1 beschrijven wij de modus operandi van hoe forensische onderzoekers de locatie van de oorsprong bepalen gebaseerd op een bloedspoor patroon. Daarnaast beschrijven we de huidige stand van zaken betreffende de impact en spreiding van druppels in het algemeen. Het bepalen van de snelheid van een druppel is niet makkelijk noch vanzelfsprekend. Welke experimentele parameters er een invloed hebben op de maximale spreiding van een druppel, staat binnen de gemeenschap van vloeistof dynamica nog steeds ter discussie.

In hoofdstuk 2 rapporteren wij de fysieke eigenschappen van bloed waaronder oppervlaktespanning en viscositeit. Binnen de forensische gemeenschap wordt doorgaans aangenomen dat de oppervlaktespanning van bloed constant is en voor iedereen hetzelfde is. Om deze aannames te

testen werd de oppervlaktespanning van bloed gemeten voor verschillende plasma-rode bloedcel concentraties gedurende een lange tijd. We vonden dat de oppervlaktespanning van bloed significant verandert over lange tijdseenheden in de orde van minuten tot uren. Desalniettemin, is de oppervlaktespanning van bloed niet afhankelijk van de plasma-rode bloedcel concentratie. De tijdschaal van een bloeddruppel die door de lucht vliegt, na een inslag van een object in bloed, en neer komt op een oppervlak, is in de orde van milliseconden. Binnen deze tijd nemen we aan dat de oppervlakte spanning van bloed niet significant verandert.

Bloed is een zogenaamde niet-Newtoniaanse vloeistof, wat betekent dat het zich niet gedraagt als een normale vloeistof zoals bijvoorbeeld water. Bloed is een 'shear thinning' vloeistof, de viscositeit neemt af met toenemende druk of afschuifsnelheid. Daarom zijn de viskeuze eigenschappen gemeten met een reometer en is de viscositeit bepaald over een groot bereik van afschuifsnelheden. We vonden dat voor hele hoge afschuifsnelheden de viscositeit een constante waarde bereikt. Daarnaast, laten we, gebaseerd op onze berekeningen, zien dat de afschuifsnelheid van een druppel die neer komt op een ondergrond met een bepaalde snelheid, een hele hoge afschuifsnelheid heeft en dus een constante viscositeit gedurende spreiding.

Hoe groter de druppel, hoe groter de vlek. Gebaseerd op deze eenvoudige verklaring is het duidelijk dat het volume van de druppel nodig is om de grootte van de vlek te koppelen aan de snelheid waarmee die gecreëerd is. Echter, op plaats delict zijn de meeste bloeddruppels opgedroogd. In hoofdstuk 3 beschrijven wij hoe het volume van een opgedroogde bloedvlek bepaald kan worden door middel van twee verschillende scan methodes, namelijk Optische Coherentie Tomografie en met een apparaat genaamd AreaScan3D. Daarnaast, tonen wij aan dat het mogelijk is om het originele volume van de druppel te berekenen aan de hand van het percentage bloed dat is overgebleven na opdrogen.

In hoofdstuk 4 hebben we bepaald hoe de impactsnelheid van een druppel (in het algemeen) gecorreleerd is aan het zowel volume van de druppel als de maximale diameter van de resulterende vlek. Derhalve hebben we druppels van allerlei vloeistoffen met verschillende viscositeit en bloeddruppels laten vallen waarbij de impact gefilmd werd met een hogesnelheidscamera. Daarmee laten wij zien dat het spreiden van de druppel bepaald is door een energiebalans tussen de capillaire, viskeuze en inertie krachten welke verder gaat dan de standaard gebruikte benaderingen. Gebaseerd op de gevonden relaties was het mogelijk om een algemene formule te maken voor de impactsnelheid als een functie van de grootte van de vlek en het volume.

Vervolgens beschrijven wij in hoofdstuk 5 hoe we echte impact bloedspoorpatronen hebben gemaakt in het Nederlands Forensisch Instituut, waarbij alle parameters gemeten werden die nodig zijn om de oorsprong te kunnen bepalen. De bloedspoorpatronen werden gemaakt door een hamer, die vast zat aan een veer, in een plasje bloed te laten slaan. De hamer werd op afstanden van 50 cm, 100 cm en 150 cm geplaatst van de muur. Door het effect van zwaartekracht mee te nemen, was het mogelijk om de oorsprong veel nauwkeuriger te bepalen dan wanneer de rechte lijn benadering toegepast werd. Nooit eerder was het mogelijk om de hoogte van de oorsprong met zo een grote nauwkeurigheid te bepalen, waardoor we met de beschreven techniek nu een zittende en staande positie van een slachtoffer kunnen onderscheiden.

In hoofdstuk 6 gaan we één stap verder door te onderzoeken of neergaande bloedvlekken meegenomen kunnen worden in de analyse. Met de rechte lijn benadering worden neergaande vlekken niet meegenomen in de analyse omdat deze de hoogte van de oorsprong zeer hoog kunnen overschatten, door de parabolische beweging van een druppel door de lucht. Door zwaartekracht in onze berekeningen op te nemen, is het mogelijk om dit soort vlekken voortaan ook te gebruiken om de locatie van de oorsprong te bepalen. Daarvoor hebben we extra bloedvlekken gekozen van impact bloedspeer patronen met een neerwaartse richting. De meerderheid van de bloedvlekken kan gebruikt worden voor de analyse van onze nieuwe methode zolang gericht zijn naar een gezamenlijke oorsprong, het gebied van convergentie.

In hoofdstuk 7 hebben we het onderzoek voort gezet naar de impact en spreiding van druppels door het effect van de ondergrond mee te nemen. Hierbij bekeken we met name de hydrofobiciteit, de ruwheid en de porositeit van de ondergrond. In hoofdstuk 4 werden alleen gladde oppervlaktes gebruikt die niet erg hydrofoob waren. Daarbij troffen we geen verschillen aan in spreiding bij de verscheidene ondergronden. Daarentegen zijn de eigenschappen van het oppervlak die spreiding beïnvloeden belangrijk en in het bijzonder bij lage snelheden. Om te bepalen of en hoe een oppervlak de spreiding beïnvloedt, hebben we druppels van ethanol, water en water-glycerol mengsels, laten vallen met verschillende snelheden op verschillende ondergronden. Hierbij vonden we dat voor hele lage snelheden en vloeistoffen met een lage oppervlakte spanning, de druppels verder uitspreiden dan het voorgaande model voorspelde. Vervolgens hebben we het model aangepast door de grootte van de vlek bij een snelheid van nul er in mee te nemen. Dit stelde ons in staat om nog eenmaal het spreiden van druppels te beschrijven doormiddel van één vergelijking. Daarbij rapporteren wij de nieuwe resultaten van druppel impact op onregelmatige en poreuze media.

Tot slot beschrijven we in hoofdstuk 8 hoe onze methode bloedspeerpatroonanalyse ten goede kan veranderen en welke stappen nog ondernomen moeten worden zodat deze methode toegepast kan worden op een plaats delict. We laten ons toekomstbeeld zien van de forensische wetenschappen en hoe 3D visualisatie de implementatie van onze methode kan verbeteren en ondersteunen. We verwachten dat ons model van groot belang is voor forensische wetenschappers en onderzoekers welke bloedspeerpatroonanalyse gebruiken om de gebeurtenissen die hebben plaats gevonden op plaats delict te reconstrueren.

### **English Abstract**

Bloodstain Pattern Analysis is a forensic methodology used by investigators to determine, among others, where the blood shedding event happened and how. For example, a forensic investigator wants to determine where the victim was when a specific bloodstain pattern was created. To determine where the blood source was, investigators use a straight-line approximation for the trajectory of the blood droplets, ignoring the effects of gravity and air resistance and thus overestimating the height of the source. This height overestimation depends on the distance between the origin and the bloodstain pattern, but at a distance of one meter from the wall, it is not possible to distinguish between, e.g., a standing or sitting position. Accordingly, it is not possible to accurately determine the position of the victim or the perpetrator which could be crucial for a claim of, e.g., self-defense.

To determine the curved flight path of a blood droplet by including the effects of gravity and air resistance, the velocity at the moment of impact of the droplet is required. This thesis presents the PhD research on the dynamics of impact and spreading of droplets to answer the following research question: Is it possible to determine the impact velocity of a dried bloodstain, and accordingly calculate its curved trajectory to determine where it came from?

Chapter 1 describes the current modus operandi of forensic investigators to determine the location of the origin based on impact bloodstain patterns, the assumptions the investigators make and the consequences thereof. Moreover, it presents the current state of affairs concerning the impact and spreading of droplets in general. Determining the impact velocity from the size and volume of a dried bloodstain is not straightforward. Within the fluid dynamical community, how exactly the maximum diameter that the droplet attains varies with the experimental parameters, remains a much-debated issue.

In Chapter 2 the physical properties of blood are reported, like surface tension and viscosity. Within the forensic community it has always been assumed that the surface tension of blood is constant and the same for everyone. To test these assumptions, blood surface tension was measured for various plasma/red blood cell concentrations for a long time period. We found that the surface tension of blood changes significantly over time periods in the order of minutes and hours. Nevertheless, the surface tension is independent on plasma/red blood cell concentrations. A droplet flight and impact event happens on a timescale in the order of milliseconds, for which we assume that the surface tension of blood does not significantly changes.

Blood is a so-called non-Newtonian fluid, which means that it does not behave as normal liquids, like water. Blood is known to be a shear thinning fluid; the viscosity decreases for high shear rates or stresses. Therefore, we measured the viscous properties with a rheometer and determined the viscosity over a large shear rate range. We found that for very high shear rates, the viscosity becomes constant. In addition, based on calculations we show that the shear rate of an impacting droplet is very high and we can assume that the viscosity is constant during spreading.

A bigger droplet will create a bigger stain. Based on this simple statement, it is clear that one requires the volume of a droplet to correlate it to the impact velocity and the size of the resulting stain. However, on the crime scene bloodstains are usually dried. In Chapter 3 we report on how the volume of a dried bloodstain can be determined with two different 3D scanners, namely Optical Coherence Tomography and the AreaScan3D. In addition, we show that it is possible to calculate what the original volume was based on the percentage of blood left after drying.

In Chapter 4, we determined how impact velocity of a droplet (in general) is correlated to the volume of the droplet and the maximum diameter of the resulting stain. Therefore, we created droplet impact events with simple fluids varying in viscosity and blood, which we recorded with a high-speed camera. We show that the stain shape is determined by a balance of capillary, viscous and inertial forces that goes beyond commonly used approximations. Based on the relations found, we were able to determine a general formula for the impact velocity as a function of stain size and volume.

Next, we created actual bloodstain impact patterns on the Netherlands Forensic Institute where we measured all parameters necessary to determine the origin (Chapter 5). Bloodstain patterns were formed by using a hammer on a spring setup, which was placed at several distances from the wall, 50 cm, 100 cm and 150 cm. By taking the effect of gravity into account we show that the accuracy in the reconstructed height of the origin of the bloodstains is increased significantly, comparing to results obtained from the straight-line approximation. Never before was it possible to determine the position and height of the blood source with such a high accuracy, enabling to distinguish between a sitting and standing position.

In Chapter 6 we take it one step further by investigating if downward directed stains could be taken into account in the analysis. With the straight-line approximation, downward directed bloodstains are discarded as they severely overestimated the height due to the parabolic nature of the actual trajectory. As we can take gravity into account, we open up the possibility that these kinds of stains can be used for the determination of the origin's location. Therefore, additional bloodstains were chosen from the impact pattern with downward directionalities, which we included in the analysis. We found that the majority of the downward directed bloodstains could be used for our new method, as long as they pointed towards a common origin, the area of convergence.

In Chapter 7 we further investigate the impact and spreading of droplets, by including the effects of the substrate like wetting, roughness and porosity. In Chapter 4, only smooth partial wettable surfaces were used, where we found no significant differences in spreading between the substrates. However, how the properties of the surface influence spreading, especially at low impact velocities, is of high importance for a number of applications, in addition to bloodstain pattern analysis. To determine if and how the surface influences spreading, droplets of ethanol, water and water-glycerol mixtures were deposited over a large range of impact velocities on many different kinds of surfaces. We found that for very low impact velocities and fluids with low surface tension, the droplets tend to spread much more than our model predicts. Therefore, we corrected the model to account for the size of the stains at zero impact velocity, by using an initial spreading ratio. This enabled us, once again, to describe the spreading of droplets by means of one equation. In addition, we report on preliminary experiments of droplet impact on irregular and porous materials.

Finally, in Chapter 8, we describe how our method can change bloodstain pattern analysis and what needs to be done before the method can be applied on real crime scenes. We show the future of forensic science and how 3D visualization can improve the implementation of our method. We anticipate that our model will be of considerable importance for forensic scientists who use bloodstain pattern analysis to reconstruct events that have taken place on the crime scene.