

Academiejaar 2010-2011

CSI Gent: Virtuele autopsie en medicolegale aspecten in de radiologie

Stephanie PAUWELS

Promotor: Prof. Dr. Koenraad Verstraete

Scriptie voorgedragen in de 2^{de} Master in het kader van de opleiding tot
MASTER IN DE GENEESKUNDE

Voorwoord

Ik wens bij het begin van mijn masterproef de mensen te bedanken die het mogelijk maakten om dit werk tot een goed einde te brengen.

Eerst en vooral gaat mijn grote dank uit naar mijn promotor Prof. Dr. K. Verstraete, die mij de mogelijkheid gaf om over dit onderwerp te schrijven. Ik wil hem bedanken voor de goede begeleiding, raad en verbeteringen bij het werken aan deze thesis. Ik ben hem eveneens zeer dankbaar voor de mogelijkheid om mee te mogen werken aan het forensisch-radiologisch onderzoek omtrent CT scans van drenkelingen.

Tevens zou ik graag mijn commissaris Prof. Dr. M. Piette willen bedanken die mij met raad en daad bijstond in het zoeken naar literatuur voor het forensisch radiologisch onderzoek. Ik wil hem ook bedanken voor het nalezen en verbeteren van mijn teksten hieromtrent.

Vervolgens wil ik Elke Hillewig bedanken, die steeds bereid was om mij aan de gepaste naslagwerken te helpen en mij bij te staan waar nodig.

Verder gaat mijn dank uit naar Alain Remue, Patrick Maes en Lucrèce Renard van de Cel Vermiste Personen en het Disaster Victim Identification Team van de Federale Politie. Zij hebben mij zeer gastvrij ontvangen en hun uiterste best gedaan om mijn vragen zo goed mogelijk te beantwoorden. Ik dank hierbij nogmaals Prof. Dr. M. Piette en tevens de lokale politie zone Lebbeke-Buggenhout om mij in contact te brengen met deze mensen.

Tot slot wil ik mijn familie, mijn vriend Lieven Van Medegael en mijn vrienden bedanken voor hun steun tijdens de voorbije twee jaar.

Inhoud

Voorwoord	i
Abstract.....	1
Inleiding	2
Methodologie	6
Resultaten	7
1. Wie is het?	7
1.1. Identificatieproces.....	7
1.2. Antropologische parameters.....	8
1.3. Radiologische identificatie van lichamen en persoonlijke restanten.....	11
1.4. Radiologie bij mass casualty situations	13
1.5. Cel Vermiste Personen en Disaster Victim Identification Team van de Federale Politie België	15
2. Wat is de doodsoorzaak?	18
2.1. The Virtopsy® Project: doelstelling	18
2.2. Technische apparatuur en onderzoeksmethodiek van het Virtopsy® project	19
2.3. Algemene voor- en nadelen van CT – MRI - klassieke autopsie	22
2.4. Kostprijs?	23
2.5. Algemene bevindingen.....	24
2.6. Steek- en schotwonden	27
2.7. 3D reconstructie van verkeersongelukken met voetgangers of fietsers.....	29
2.8. Haptische technologie bij reconstructies	31
2.9. Toxopsy?.....	32
2.10. Data management en teleconsultatie	33
2.11. Virtuele autopsie in het UZ Gent.....	34
3. Hoe lang is het slachtoffer reeds overleden?.....	43
4. Medicolegale aspecten in de radiologie.....	43
5. Andere mogelijkheden binnen de forensische radiologie	44
5.1. Paleo-radiologie.....	44
5.2. Radiologie bij niet-gewelddadige misdrijven	44
5.3. Kindermishandeling, mishandeling van ouderen en partner	44
Discussie.....	45
Conclusie.....	48
Geciteerde werken	49

Bijlagen.....	A
Bijlage 1.....	A
Bijlage 2.....	C
Bijlage 3.....	D
Bijlage 4.....	E
Bijlage 5.....	F
Bijlage 6.....	P
Bijlage 7.....	T
Bijlage 8.....	U
Bijlage 9.....	W
Bijlage 10.....	X
Pathologische bevindingen bij verdrinking.....	Z
Inleiding	Z
Uitwendig onderzoek.....	AA
Huid.....	AA
Hoofd en hals.....	BB
Inwendig onderzoek	CC
Hoofd en hals.....	CC
Thorax.....	DD
Abdomen.....	FF
Bloedonderzoek.....	FF
Decompositie.....	HH
Bepaling van de waterlichtijd	II
Diatomeeënonderzoek	II
Bepaling mogelijke doodsoorzaak	KK
Accidentele verdrinking	KK
Suicidale verdrinking.....	KK
Verdrinking door moord.....	KK
Verdrinking in bad.....	LL
Verplaatsing van het lijk.....	MM
Radiologische bevindingen bij oedeem en aspiratie	MM
Hydrostatisch pulmonair oedeem	MM
Aspiratie van zand.....	NN
Radiologische bevindingen bij verdrinking	OO
Bijna-verdrinking.....	OO

Verdrinking (CT tov. autopsie)	OO
Paranasale sinussen en mastoid	OO
Luchtwegen.....	PP
Hart en bloedvaten	QQ
Maag en duodenum.....	QQ
Bijna-verdrinking tov. verdrinking	RR
(Cerebrale) Arteriële gasembolie bij duikongevallen	SS
Bevindingen Virtopsy© Project	TT
Bibliografie	UU
Bijlage 11.....	XX

Abstract

ACHTERGROND: Heden ten dage is er grote interesse vanuit de forensische radiologie voor virtuele autopsie. De universiteit van Bern doet grote inspanningen om dit concept uit te werken in hun Virtopsy® project. Ook andere onderzoeksgroepen doen onderzoek naar dit onderwerp.

DOELSTELLING: Er werd getracht een beeld te geven van de stand van zaken tot nu toe wat betreft identificatie en virtuele autopsie.

METHODOLOGIE: Voor deze masterproef werd een literatuurstudie uitgevoerd, waarbij boeken en artikels omtrent dit onderwerp geraadpleegd werden.

RESULTATEN: Er kon een beeld geschetst worden van de virtuele autopsie tot nu toe. Highlights in de bespreking zijn identificatie, het Virtopsy® project en het onderzoek van het UZ Gent omtrent CT scans van drenkelingen. Ook de stand van zaken op Belgisch vlak werd vermeld.

DISCUSSIE: Op vlak van identificatie staat men vrij ver. Wat betreft virtuele autopsie kan men besluiten dat er reeds veel onderzoek gebeurd is. De techniek is echter nog niet ten volle uitgewerkt om als standaard gebruikt te kunnen worden. In België worden de bestaande technieken nog niet ten volle aangewend. Er is echter wel interesse om dit in de toekomst te veranderen.

CONCLUSION: Virtuele autopsie is een veelbelovende tak van de forensische radiologie. De volledige uitwerking van het concept vraagt echter nog verder onderzoek. Op dit moment is virtuele autopsie een uitstekend hulpmiddel bij de klassieke autopsie, maar het kan de gouden standaard nog niet vervangen.

Inleiding

Het doel van de forensische geneeskunde is om de medisch wetenschappelijke bevindingen die gevonden worden in zowel levende als overlevende personen te documenteren, analyseren, en verklaren, op een manier die voor het gerecht verstaanbaar is. In forensische genetica en forensische toxicologie wordt reeds geruime tijd gebruik gemaakt van moderne technologie. Forensische pathologie daarentegen maakt nog steeds voornamelijk gebruik van een scalpel, verbale beschrijving en conventionele tweedimensionele fotografie. De bevindingen zijn subjectief, en alles wat niet beschreven is, is verloren als bewijs wanneer het lijk verbrand wordt. (1) De forensische radiologie probeert hier een mouw aan te passen.

Het verhaal van de forensische radiologie begint in principe in 1895, wanneer Wilhelm Conrad Röntgen de röntgenstraal ontdekt waarmee structuren in het menselijk lichaam zichtbaar gemaakt kunnen worden. De eerste rechtszaak waarbij gebruik gemaakt werd van röntgenstralen ging reeds van start op kerstavond van 1895 in Noord-Amerika! In Engeland gebeurde dit in het begin van 1896. De eerste schadeclaim met röntgenfoto's als bewijs werd ingediend in 1896 en in 1897 vond de eerste rechtszaak voor moord met röntgenologisch bewijs plaats. In the JAMA van 30 mei 1896 werd reeds gesproken over de mogelijkheid om de stralen te gebruiken bij het identificeren van de inhoud van mogelijks gevaarlijke pakketten. Dit was het begin van de forensische tak van de ingenieurswetenschappen. Er is zelfs tijdelijk gebruik gemaakt van röntgenstralen om vingerafdrukken te documenteren, voor dit opzij werd geschoven voor de gemakkelijkere inktafdruk. De eerste nationale bekendheid die onderworpen werd aan een radiologisch onderzoek was President Roosevelt, bij wie men succesvol de kogel zocht die hem raakte bij een moordpoging in 1912. President J.F. Kennedy had minder geluk en zijn lijk werd aan post-mortem radiografie onderworpen na de aanslag op hem in 1963. De forensische odontologie ontstond in 1896 met radiografie van de tanden, maar deze tak van de geneeskunde werd pas echt bedreven vanaf de jaren 1940. In die periode werd ook Adolf Hitler's gebit onderzocht voor en na zijn dood en waarmee de identificatie van zijn lijk mogelijk gemaakt werd. Het lichaam van Joseph Mengele werd tevens radiologisch onderzocht ter identificatie. Het onderzoeken van mummies ten slotte startte reeds in 1896. We kunnen dus stellen dat de basis voor de forensische radiologie zoals we die nu kennen, reeds gelegd werd in de eerste jaren na de ontdekking van de röntgenstraal. (2)

De CT-scan werd door Wullenweber et al. voor het eerst gebruikt in de forensische geneeskunde in 1977. Men onderzocht en beschreef toen het patroon van een schotwonde in het hoofd. Door het feit dat de techniek nog niet de kwaliteit van nu kende, zijn slechts een paar studies uitgevoerd in verband met full body post mortem CT. Ook toen in 1989 de spiraal CT in gebruik werd genomen die 3D beeldvorming mogelijk maakte, kwam er geen interesse vanuit forensische hoek. Het gebruik van full body post mortem MRI werd door een aantal onderzoeksgroepen beschreven bij niet-forensische gevallen voor de detectie van grote craniale, thoracale en abdominale pathologiën. Enkele groepen hebben studies uitgevoerd op één enkel orgaan, vooral wat betreft schotwonden. Tot voor kort maakte geen enkele forensische dienst of onderzoeksgroep gebruik van de combinatie van systematische whole body CT én MRI. In de jaren 1990 ontstond het idee van een objectieve, niet-invasieve documentatie van het lichaamsoppervlak. Dit kwam er na de ontwikkeling van de forensische fotogrammetrie. In 2000 kwam men met het idee om dit te combineren met de expert onafhankelijke documentatie van inwendige problematiek. Dit is hoofdzakelijk het werk van het Virtopsy® project aan de universiteit van Bern, Zwitserland. (1)

Het terrein van de forensische radiologie zoals wij deze vandaag kennen, spreidt zich uit over vier gebieden zoals beschreven door Brogdon B.G.

Scope of Forensic Radiology

- I. Service**
 - A. Determination of Identity**
 - B. Evaluation of Injury and Death**
 - 1. Accidental**
 - 2. Nonaccidental**
 - a. Osseous Injury**
 - b. Missiles and foreign bodies**
 - c. Other trauma**
 - d. Other causes**
 - C. Criminal Litigation**
 - 1. Fatal**
 - 2. Nonfatal**
 - D. Civil Litigation**
 - 1. Fatal**
 - 2. Nonfatal**
 - E. Administrative Proceedings**
- II. Education**
- III. Research**
- IV. Administration**

(Tabel 3-1 uit Forensic Radiology, Brogdon B.G.)

De identificatie van een persoon via radiologie kan gebeuren op verschillende werkwijzen. Uiteraard maakt men eerst gebruik van de gewone biomedische kennis en standaarden om basisgegevens te verkrijgen zoals leeftijd en geslacht. Verder kan men vooraf bestaande verwondingen of congenitale afwijkingen aantonen. Men kan ook ante- en postmortem beeldvorming met mekaar vergelijken. De dag van vandaag is er steeds meer mogelijk dankzij de toepassing van andere radiologische technieken dan röntgenopnames. Dit maakt de identificatie er echter soms niet makkelijker op wegens het gebruik van andere aanzichten dan frontaal en lateraal. (2)

De evaluatie van verwonding of dood heeft nood aan detectie, patroonherkenning, interpretatie en vergelijking. Dit dient gebaseerd te zijn op ervaring bij normale en abnormale bevindingen van zowel mannelijke als vrouwelijke patiënten van alle leeftijden. Er wordt vaak vooral gekeken naar het skelet, maar ook het musculoskeletaal systeem en de thoracale en abdominale viscera kunnen veel informatie bieden. (2)

Wat betreft de bruikbaarheid van beeldvorming bij strafrechtelijke zaken is er een brede waaier aan mogelijkheden. Zo biedt het een meerwaarde bij moord, zelfmoord, slagen en verwondingen, ... Ook bij niet-gewelddadige misdrijven zoals drugsmokkel en diefstal heeft het een plaats verworven. De radioloog kan tevens aangesproken worden om mee te werken aan een rechtszaak in verband met aansprakelijkheid. Dit heeft dan vooral te maken met persoonlijke verwondingen of onrechtmatige dood. Bij administratieve procedures, zoals omtrent werkonbekwaamheid, speelt de radioloog regelmatig een rol als getuige. (2)

Het zichzelf bekwamen in de forensische radiologie is niet eenvoudig. Er bestaan geen specifieke opleidingen in dit vakgebied. Men dient zich bij te scholen via lezingen, individuele case studies, ervaring en publicaties. Vaak spreken daarbij radiologen, ook onderling, en niet-radiologen elkaar tegen. De forensische radiologen dienen echter ook aan public education te doen, zoals bijvoorbeeld campagne voeren in verband met het wakker schudden van de samenleving ivm. het bestaan van kindermisbruik. (2)

In deze masterproef probeer ik een beeld te geven van de forensische radiologie zoals wij die heden ten dage kennen. Hiervoor spits ik mij vooral toe op de tak identificatie en autopsie. Virtuele autopsie is een innoverende tak van de forensische radiologie die ingang probeert te vinden in de gerechtelijke geneeskunde van vandaag. Ik probeer een globaal beeld te schetsen van de mogelijkheden die er zijn, de voor- en nadelen van de modaliteiten en de haalbaarheid van werken met dit concept. Ik heb gewerkt volgens de drie belangrijkste vragen die men zich stelt bij een lijk in de gerechtelijke geneeskunde: wie is hij of zij, wat is de doodsoorzaak en hoe lang is hij of zij reeds overleden. Op het einde vermeld ik kort

nog enkele andere zaken die aan bod komen in de forensische radiologie. Uiteraard is deze lijst niet volledig. Deze tak van de geneeskunde omhelst veel meer gebieden dan ik hier kan beschrijven. Aangezien dit werk vastgelegd is op maximum vijftig pagina's heb ik naar eigen interesse bepaalde delen dieper uitgewerkt en andere meer aan de oppervlakte gelaten.

“In the ideal medicolegal facility the use of medical imaging should be as routine as the autopsy and, in point of practical fact, may be used as a substitute for the autopsy under certain situations.”

- J. F. Edland

Methodologie

Naar aanleiding van de masterproef die wij dienen te maken in eerste en tweede master geneeskunde dienden wij een keuze te maken tussen een literatuurstudie of onderzoek als modaliteit. Ik koos ervoor om een literatuurstudie te maken die aansloot bij mijn persoonlijke interesses en selecteerde dit onderwerp uit de lijst met mogelijke titels voor een literatuurstudie. Om te starten met deze masterproef wenste ik eerst een idee te hebben over de mogelijkheden van dit onderwerp. Ik wou de werkelijkheid toetsen aan het idee dat ik zelf had over deze tak van de geneeskunde. Hiervoor had ik een inleidend gesprek met Prof. Dr. K. Verstraete. Om inzicht te krijgen in de reikwijdte van de forensische radiologie kreeg ik van hem het boek “Forensic Radiologie” van B.G. Brogdon ter beschikking. Dit boek heb ik gebruikt als basiswerk voor de gehele masterproef.

Verder zocht ik op pubmed naar de onderwerpen forensische radiologie en virtuele autopsie. Al snel botste ik op het Virtopsy® project. Dit werd één van de grootste pijlers uit mijn masterproef. Bij mijn zoektocht naar literatuur ben ik vertrokken bij de trefwoorden: forensic radiology, virtual autopsy, virtopsy, radiology, identification, autopsy. Vanuit de relevante literatuur die ik op deze manier kon verzamelen, zocht ik verder via de functie related articles. Zo kon ik de nodige literatuur voor deze masterproef verkrijgen. Verscheidene keren ben ik op artikels gestoten die bijna letterlijk hetzelfde vertelden als artikels die ik reeds gelezen had. Ik achtte het niet opportuun om deze allemaal op te nemen in de lijst met referenties. Ik heb steeds gekozen om het originele artikel of belangrijke reviews te gebruiken.

Om het onderwerp identificatie een originele uitwerking te geven, ben ik er in geslaagd een bezoek te brengen aan de Cel Vermiste Personen en het Disaster Identification Team van de Federale Politie. Op deze manier kon ik de wetenschappelijke literatuur toetsen aan de dagelijkse praktijk in België.

Tevens kreeg ik de kans om mee te werken aan een forensisch-radiologisch onderzoek van het UZ Gent. Dit is een samenwerking tussen de dienst gerechtelijke geneeskunde van universiteit Gent en de dienst radiologie van het UZ Gent. Deze studie draait rond de mogelijkheid van virtuele autopsie bij de autopsie van drenkelingen. Voor dit onderzoek verzorgde ik de literatuur. Om dit te verwezenlijken kon ik terecht bij Prof. Dr. M. Piette. Hij bezorgde mij drie basiswerken. De informatie die ik kon verzamelen uit deze boeken breidde ik uit met informatie van pubmed. De hoofdzoektermen waren: drowning, virtual autopsy, autopsy, radiology, pathology. Hierbij werkte ik eveneens verder via de optie related articles.

Resultaten

1. Wie is het?

1.1. Identificatieproces

De methodes welke gebruikt worden bij de identificatie van een lichaam zijn zeer divers. Vooral de toestand waarin het lichaam gevonden wordt draagt bij tot de keuze van de meest relevante methode bij het onderzoek. Er zijn zowel zeer betrouwbare als minder betrouwbare methodes. Tot de minder betrouwbare horen de visuele inspectie of foto's van het lijk, tatoeages als herkenningspunt en persoonlijke bezittingen die gevonden werden bij het lichaam. De betrouwbare methodes zijn deze waarbij gebruik gemaakt wordt van anatomische documentatie zoals vingerafdrukken, tandheelkundige gegevens, radiologische beelden van geheelde fracturen, suturen,... Deze gegevens worden gecorreleerd aan ante-mortem beeldvorming of gegevens. Het spreekt voor zich dat indien de restanten in zo'n staat zijn dat beeldvorming en dergelijke niet meer mogelijk is, of indien er geen ante-mortem informatie aanwezig is, deze methode niet van toepassing is. (2)

In het geval een slachtoffer goed herkenbaar is en sterft op een plaats waar hij of zij gekend is, zoals thuis of in een ziekenhuis kan een politieverlag of een identificatiebandje van het ziekenhuis (medicolegaal) volstaan ter identificatie. Wanneer het bijvoorbeeld gaat om een sterfgeval in een grote stad waar de persoon niet gekend was door zijn omgeving, kan visuele identificatie door iemand die het slachtoffer kende tijdens zijn leven nodig zijn. Indien een lichaam in staat van ontbinding is of verminkt is, op welke wijze dan ook, is het de beurt aan de batterij wetenschappelijke methodes om de identificatie mogelijk te maken. Een eerste stap is dan om medische gegevens, radiografieën, vingerafdrukken en dergelijke te verzamelen. Wanneer dit niet mogelijk is wordt een antropoloog ingeschakeld om een idee te geven van leeftijd, geslacht, ras en gestalte van de overledene. Op deze manier wordt de zoektocht al iets gespecificeerd. In het geval dat de schedel aanwezig en relatief intact is, kan een gespecialiseerd antropoloog proberen om een reconstructie te maken van het gezicht, waarna de familie mogelijks het slachtoffer kan identificeren. Ook biochemische genetische markers, serologische methodes en DNA analyse zijn dankbare hulpmiddelen. (2)

Nog moeilijker wordt het wanneer de overledene niet gekend is en ook niet opgegeven werd als vermist. In dat geval wordt de media ingeschakeld om familie of kennissen te zoeken. Vervolgens wordt in databanken gezocht naar matching vingerafdrukken. Ook een vals gebit of prothesen kunnen een stap in

de goede richting betekenen wanneer zij identificatiegegevens bevatten. Tenslotte bewijzen databanken voor vermiste personen of niet-geïdentificeerde personen hun nut. Hierin worden de gegevens uiteindelijk ingevoerd in de hoop een bijhorend dossier te vinden. (2)

1.2. Antropologische parameters

Wanneer het lijk in staat van ontbinding is of verbrand is en dergelijke, en de staat van de (oppervlakkige) weke delen geen identificatie meer toelaat, zoekt men zijn heil in de radiologische identificatie. Vooreerst probeert men dan om antropologische parameters zoals de differentiatie mens-dier, leeftijd, geslacht, ras en postuur te bepalen. (2)

“... bones make good witnesses – although they speak softly, they never lie and they never forget. Each bone has its own tale to tell about the past life and death of the person whose living flesh once clothed it.

Like people, some bones impart their secrets more readily than others; some are laconic; others are positively garrulous.”

- Clyde Collins Snow and John Fitzpatrick

Voor iemand die bedreven is in de menselijke anatomie of osteologie is het niet moeilijk om een verschil te maken tussen beenderen afkomstig van mens of dier. Vaak zijn er anatomische verschillen in bijvoorbeeld lengte en vorm. Er zijn verschillen op vlak van processi en afdrukken van organen op het bot. Ook is er een karakteristiek verschil tussen de spongiosa en medulla van mens tov. dier. Bij de mens heeft de spongiosa een regelmatige structuur. De ruimtes tussen primaire en secundaire trabeculae zijn rond tot ovaal. Daarenboven bedraagt de zone tussen cortex en medulla 1 tot 3 millimeter. Bij een dier is deze junctie scherper en heeft de spongiosa een meer homogeen beeld. (2)

De leeftijd kan behoorlijk precies afgeleid worden met behulp van radiografie. Het lichaam bevat 206 botten, daarvan heeft de meerderheid groeischijven. Aan de hand van het verschijnen van deze groeischijven en het fusioneren van primaire met secundaire diaphysen kan men de botleeftijd afleiden. Dit gebeurt namelijk volgens een bepaald tijdschema. Foetaal verschijnt het skelet pas rond de twintigste week van de zwangerschap. De leeftijd kan dan echografisch bepaald worden aan de hand van onder andere de kruin-romp meting, lengte van de femur en bipariëtale diameter. Meisjes zijn over het algemeen vanaf een paar maanden na de geboorte voor op jongens wat de maturatie van het skelet betreft. Er zijn dan ook aparte tabellen voorzien bij de bepaling. Ook tussen de rassen zijn er belangrijke verschillen. Tot

ongeveer twintig jaar wordt de leeftijd afgeleid uit het verschijnen en fuseren van secundaire epiphysen. De epiphyse die het laatst sluit is deze aan het mediale einde van de clavicula. Dit gebeurt tijdens de derde levensdecade. Tussen vijftig en veertig jaar leidt men de leeftijd af uit het voorkomen van de suturen van de schedel en de symphysis pubica, wat radiologisch niet mogelijk is. Vanaf 40 jaar beginnen de gewrichten te verslijten. Aan de hand van de degeneratieve veranderingen, van bijvoorbeeld de ruggenwervel, kan men tot vijf à tien jaar precies de leeftijd voorspellen. Dit interval vergroot echter wel bij het stijgen van de leeftijd. Uiteraard is deze opsomming van methodes niet eindig en zijn er wereldwijd nog andere manieren om de skeletleeftijd te bepalen. (2)

De radiografische bepaling van het geslacht is pas accuraat na de puberteit. Men ziet dan dat het mannelijke skelet zwaarder gebouwd is, dat de beenderen langer zijn, dat de plaatsen waar spieren aanhechten prominenter zijn en dat het sneller degeneratieve afwijkingen vertoont. Men bestudeert vooral de beenderen van het bekken bij de differentiatie, waarbij men specifiek let op bijvoorbeeld het foramen obturatorius dat groot en rond is bij de man en klein en driehoekig bij de vrouw tegenover de bekkeningang die rond is bij de vrouw en driehoekig bij de man. Een volledige bespreking van alle factoren waar rekening mee gehouden wordt ter hoogte van het bekken zou ons te ver leiden. Verder bekijkt men ook de schedel. De mannelijke schedel is mesocephalisch tot dolichocephalisch en het voorhoofd is steiler. De man heeft onder andere een grotere supraorbitale rand, mandibula en arcus zygomaticus. De vrouwelijke schedel is mesocephalisch tot brachycephalisch. Bij de vrouw wordt de periode postmenopausaal gekenmerkt door parietal thinning, waarbij de tabula externa symmetrisch geresorbeerd wordt als gevolg van osteoporose. Andere werkwijzen zoals deze waarbij sternale lengte en calcificatie van bepaalde kraakbeenderige structuren in rekening gebracht worden, worden minder gebruikt omdat zij minder betrouwbaar of toepasbaar zijn. (2)

Wat betreft de rasbepaling richt men zijn aandacht op de schedel en de intercondylaire hoek. Beide hebben bepaalde kenmerken afhankelijk van ras tot ras. Zij kunnen wel moeilijk te evalueren worden door racial mixing. Ook de lange pijpbeenderen bieden informatie. Zo hebben zwarten een relatief langere tibia ten opzichte van de femur en is bij blanken de femur meer naar anterior gebogen. De lengte van de femur wordt ook gebruikt om het postuur van de overledene te schatten. Ook hiervoor bestaan aangepaste tabellen en de lengte kan direct gemeten worden via CT. (2)

Verhoff et al. wijzen er ons op dat alle morfologische en morfometrische osteologische parameters voor bepaling van geslacht en leeftijd reeds vele tientallen jaren oud zijn. Deze waarden en tabellen zijn bovendien populatiegebonden. Zij stellen de bruikbaarheid op de dag van vandaag sterk in vraag,

aangezien de populaties van nu niet meer te vergelijken zijn met de oudere populaties. In de jaren '80 werd de Forensic Data Bank opgericht. Deze bevat data over moderne osteologiecases en wordt voortdurend uitgebreid. De databank wordt als referentie gebruikt voor de analysesoftware Fordisc. In 2001 is het aangetoond dat radiologie van de mandibula behulpzaam is bij het bepalen van het geslacht. Later werden ook afmetingen van het foramen magnum getest als tool om mogelijks het geslacht te bepalen. Verhoff et al. achtten het interessant om hoog-resolutie whole body CT scans te kunnen onderzoeken. Zij vonden deze bij het Virtopsy® project. Men onderzocht of het mogelijk was om klassieke osteometrische parameters te berekenen uit 3D reconstructies van CT scans. Belangrijk was om na te gaan welke deviaties er zouden zijn ten opzichte van manuele metingen op een geïsoleerde schedel. Men vond dat de metingen van CT scans met een schijfdikte van 1,25 mm equivalent waren aan de manuele metingen. Er was een deviatie van slechts 1 à 2 mm tussen beide, wat overeenkomt met interobserverafwijkingen. Het objectief was om in de toekomst onderzoek te doen naar een standaardisatie van deze afmetingen, om nieuwe parameters te creëren ter bepaling van leeftijd, geslacht en postuur. (3) Dit is ook gebeurd want in 2010 werd een nieuw onderzoek gepubliceerd. Sinds de tijd van Broca (1824-1880) poogt men om met de ossificatiegraden van de craniale suturen aan leeftijdsbepaling te doen. Op de klassieke wijze is het hiervoor verplicht om het neurocranium te vernietigen. Harth et al. onderzochten deze suturen met Flat-Panel CT, aangezien uit het vorige onderzoek gebleken was dat conventionele CT niet over voldoende resolutie beschikte. De suturen werden ingedeeld in secties en in stages. Deze onderverdeling vindt u terug in bijlage 1. Zij onderzochten 221 schedels en toonden aan dat het mogelijk was om range rond de leeftijdsschatting per categorie kleiner te maken, namelijk tot 26,08-49,16 jaar. In individuele gevallen zelfs tot circa 10 jaar. Zij stellen dat deze methode nuttig is, vooral wanneer andere methodes toegevoegd worden aan het geheel. Verder onderzoek is nodig om de resultaten te bevestigen. (4)

Het UZ Gent en Universiteit Gent vertonen interesse in de bepaling van de skeletleeftijd aan de hand van radiologische evaluatie (MRI) van pols en clavicula. Dit onderwerp was de voorbije twee academiejaren (2008-2010) het onderwerp van de masterproef van Jannick De Tobel en Olivier Cuche. Voor meer informatie verwijs ik u graag naar hun werk. (5) De studie werd overgenomen door Thomas Van Der Paelt en is momenteel nog steeds lopende.

1.3. Radiologische identificatie van lichamen en persoonlijke restanten

Het opzet van radiologische identificatie is het matchen van ante- en post-mortem beeldvorming van het slachtoffer. Dit gebeurt via herkenning van specifieke of unieke kenmerken of door het gebruiken van radiologische technieken die aantonen dat op beide beelden hetzelfde (lichaamsdeel) te zien is. Onder zo'n kenmerken verstaan we bijvoorbeeld specifieke verwondingen, ziektes of anomalieën. Bij veel voorkomende eigenschappen is het nodig meerdere van die eigenschappen aan te tonen om met zekerheid de identiteit vast te leggen. Bij zeldzame afwijkingen en dergelijke is dit ene karakteristiek meestal voldoende. (2)

Om aan radiologische identificatie te kunnen doen is het normaliter nodig om een idee te hebben van wie de lichamelijke resten kunnen zijn. Wanneer men/de politie hierin slaagt, kan men op zoek gaan naar röntgenfoto's van het slachtoffer voor zijn dood. Het is mogelijk dat deze niet meer in goede staat zijn. Men kan ze dan proberen schoonmaken met bijvoorbeeld Kodak® film cleaner of bewerken met computertechnieken zoals beschreven door Fitzpatrick. In de ideale situatie kan men dan post-mortem radiologische beelden maken, waarbij men het lijk in dezelfde positie plaats als op de ante-mortem radiografie. Hierbij treden echter vele moeilijkheden op. Zo moet het mogelijk zijn om de lichamen te bewaren voor beeldvorming tot er mogelijks passende radiografieën gevonden zijn, waarvan men de positionering en dergelijke kan herhalen. Verder is het uit den boze dat de radiografie plaatsvindt na de klassieke autopsie, om bijvoorbeeld de continuïteit van het lichaam te garanderen. Indien dit niet mogelijk is, is het nodig om een whole body radiografie met standaard positionering uit te voeren, zodat men later mogelijks kan vergelijken met gelijk welke soort radiografie van een bepaald lichaamsdeel of in een bepaalde positie. Dit kost echter veel tijd en geld. Verder is er het probleem dat de meeste mortuaria niet beschikken over een röntgentoestel en dat nabijgelegen ziekenhuizen niet happig zijn om mee te werken. Zo achten zij het niet gepast om lijken binnen te brengen, in patiëntenruimtes of tijdens de werkuren, en zijn zij niet bereid om mobiele toestellen uit te lenen, omdat zij die zelf nodig hebben en veel geld kosten. Nog een ander probleem is dat er vaak geen radioloog ter beschikking is om de radiografieën te maken en te vergelijken, onder andere door geldgebrek om hem te betalen of door gebrek aan een radioloog met forensische kennis. Goede opnames maken en goed evalueren is een must voor een accurate identificatie. Het spreekt voor zich dat herhaling van de opnames, om diverse redenen, bijna nooit aan de orde is. (2)

Bij radiologische identificatie bekijkt men in de eerste plaats het skelet, aangezien botten het duurzaamst zijn in een lichaam. Over de jaren verandert hun configuratie zo goed als niet en verwondingen en dergelijke bezorgen het bot kenmerken die meestal onveranderd blijven in de tijd. Zelfs

na verbranding (tot 1100°C) bieden botten nog informatie. Wel krimpen beenderen met maximum 1% van hun totale lengte wanneer ze blootgesteld worden aan temperaturen tot 800 °C en kunnen ze longitudinale barsten vertonen. Aangezien een volledig post-mortem radiografisch onderzoek veel tijd en geld kost zou men op zoek kunnen gaan naar de opnames die meest kans hebben om te matchen met een ante-mortem beeldvorming. Het blijkt dat tachtig procent van de beeldvorming bestaat uit röntgenopnames en negen procent uit CT's, andere vormen van beeldvorming zijn (zo goed als) nutteloos bij identificatie. Veertig procent van de radiografieën zijn RX thorax. Deze zijn zeer bruikbaar aangezien de botstructuren zo goed als hetzelfde blijven met de tijd, maar nutteloos wanneer de post-mortem beeldvorming gebeurt met een slechte positionering. Men zoekt onder andere naar trauma, tumoren of anomalieën. Murphy vindt het patroon van de ossificatie van het costale kraakbeen nuttig. Een vijfde bestaat uit opnames van de extremiteiten. Aangezien er een grote kans is dat er iets mis gaat met één van de lidmaten, zoals breuken en degeneratief lijden, is er een grote kans dat er waardevolle informatie af te leiden is uit deze opnames. Men moet echter in rekening brengen dat lichaamsdelen vaak nutteloos zijn bij de identificatie door zaken als separatie, verbranding en dergelijke. De ervaring leert Brogdon dat vooral de wervelzuil en het bekken best bewaard blijven voor de identificatie, wat twintig procent van de radiografieën betreft. Er is grote verscheidenheid in de grootte en configuratie van de vertebrae en de wervelzuil wordt vaak op kenmerkende wijze aangetast door ziekte en trauma. Ook weke delen kunnen informatie bieden. Zo zijn er vaak calcificaties te zien, zoals calcificaties in de thorax zoals beschreven door Murphy. Verder bieden de hedendaagse ingrepen mogelijkheden, bijvoorbeeld het plaatsen van radio-opake vaatclips, stents, prothesen en dergelijke. (2)

Ook de vijf procent die bestaat uit opnames van het hoofd kunnen nuttig zijn. De schedel bevat vaak kenmerkende elementen. Een belangrijk gegeven bij de identificatie is de vergelijking van sinussen. Dit werd voor het eerst beschreven door Culbert en Law. De pneumatisatie van de sinussen verloopt over langere tijd en eens deze volledig is blijft de configuratie zo voor de rest van het leven. Enkel trauma, tumoren en destructieve ziektes kunnen de vorm van de sinussen aantasten, maar dit is zelden het geval. Sinussen kunnen ontploffen bij extreme hitte. De vormgeving van sinussen is zeer persoonsgebonden, zelfs een identieke tweeling heeft verschillende sinussen. Vooral de frontale sinussen zijn zeer uniek, door de geschulpte randen en interne septae en pseudoseptae. Zij kunnen onderzocht worden op frontale radiografieën van de schedel. Andere sinussen zijn moeilijker te vergelijken en hebben minder treffende verschillen. Ook mastiodale sinussen hebben bepaalde karakteristieken, maar zijn moeilijker te evalueren. Ten slotte kan ook de sella turcica gebruikt worden bij de identificatie, zoals beschreven door Voluter. (2)

Ook aparte beenderen kunnen geïdentificeerd worden aan de hand van bepaalde kenmerken, indien men er in slaagt om post-mortem via positioneren en herpositioneren opnames te maken die uiteindelijk perfect matchen met het ante-mortem beeld. Men kan ook de schaduwtechniek van Fitzpatrick en Macaluso gebruiken. De kenmerken zijn dezelfde als deze bij een volledig lijk, namelijk anomalieën, ziekte (zeldzaam), degeneratie, tumoren (zeldzaam) en trauma. Ook iatrogeen kunnen er veranderingen aangebracht zijn. Vasculaire groeven en trabeculaire patronen zijn zeer nuttig, zoals opgemerkt door Brogdon. Ook Kahana en Hiss, en Murphy beschreven het gebruik van het trabeculair patroon. (2)

Volgens Dirnhofer et al. is een klassieke post mortem identificatie alleen mogelijk op basis van gebit, DNA of vingerafdrukken, waarbij de DNA methode minder gebruikt wordt wegens de kostprijs en tijdsduur. Zij stellen dat craniale CT een mogelijkheid biedt om ante mortem projecties te reconstrueren ter vergelijking. Het is tevens mogelijk om orthopantogrammen na te maken. CT kan bovendien de aard van een tandvulling en dergelijke aantonen. Dit kan dan vergeleken worden met de tandartsgegevens van de vermiste personen die in aanmerking komen bij een bepaald geval. Verder vindt men met CT scan talrijke specifieke tekens, bijvoorbeeld een bepaalde botpathologie die een identiteit kunnen bevestigen of juist met zekerheid verwerpen. (1) Thali et al. bespreken het gebruik van Dentascan bij post mortem CT data in het kader van identificatie. Dit is processing software voor CT beelden en maakt reconstructie van gereformateerde beelden mogelijk ter vergelijking met conventionele panoramische tandradiografiën. De beelden tonen de basiscomponenten van tanden, de anatomische structuren van het alveolaire bot, missende tanden, tanden die niet doorgebroken zijn en tandherstellingen. Wanneer er metaalhoudend materiaal gebruikt is bij de tandverzorging leidt dit echter tot streperige artefacten, waardoor het nog steeds nodig is om een post mortem radiografie te maken. Het grote voordeel van deze software is de mogelijkheid om gebitten te vergelijken op een niet-invasieve manier. Bij de klassieke methode wordt namelijk nog vaak een kaakresectie uitgevoerd om de radiografische beeldvorming makkelijker te laten verlopen wanneer men te maken heeft met ernstig verminkte of gedecomposeerde lijken. Een voorbeeld kan u vinden in bijlage 2. (6)

1.4. Radiologie bij mass casualty situations

Een “speciale” toepassing van identificatie is deze bij rampen waar er grotere aantallen mensen overlijden. We denken dan aan vliegtuigongelukken, overstromingen, aardbevingen, branden in grote gebouwen, ... De identificatie is hier belangrijk om verschillende redenen, zowel emotionele (Was mijn familielid aanwezig en is hij of zij overleden?) als medicolegale (erfenissen en hertrouwen). Voor

wetenschappers is het interessant om de manier of reden van overlijden te kennen. Zij gebruiken deze informatie om patronen te zoeken in soortgelijke situaties en daarbij preventieve maatregelen te ontwikkelen om doden te voorkomen in de toekomst. Zo is er bijvoorbeeld interesse in feit of bij een vliegtuigcrash mensen sterven door de crash zelf of door de brand die ontstaat waar zij mogelijk niet uit kunnen ontsnappen. Dit kan bijvoorbeeld leiden tot aanpassing van vliegtuigen naar aanleiding van de bevindingen. (2)

De eerste case waarbij röntgenopnames gebruikt werden was de brand aan boord van de Great Lakes boot "Noronic" in Toronto, 1949. Andere gevallen waarbij forensische radiologie reeds gebruikt werd waren onder andere: de ontploffing van boten met meststoffen in de haven van Texas City in 1948, het bomincident in The Federal Building in Oklahoma in 1955 en de nucleaire ramp in Tsjernobyl in 1986. Een belangrijke speler op dit gebied is the Armed Forces Medical Examiner van the Armed Forces Institute of Pathology in Washington. Zij onderzoeken alle fatale militaire luchtvaartongelukken, waarbij full body radiografie van de slachtoffers standaard is. (2)

De identificatie gebeurt in volgorde van bruikbaarheid door visuele herkenning, herkenning van persoonlijke bezittingen, vingerafdrukken en forensische tandheelkunde. Wanneer er sprake is van mutilatie of verbranding de voorgaande methodes onmogelijk maakt, is de forensische radiologie aan zet. In sommige gevallen is de mutilatie of verbranding zo sterk dat er niet genoeg argumenten zijn voor een positieve identificatie. Er dient dan overgegaan te worden tot identificatie door exclusie. Men probeert binnen de overblijvende (kleine) groep van ongeïdentificeerde lichamen dan via weinig specifieke karakteristieken een onderscheid te maken, zoals aan de hand van geslacht, postuur en zelfs bloedgroep. Dit is uiteraard enkel mogelijk wanneer men er van uit gaat dat alle slachtoffers gekend zijn. (2)

Dirnhofer et al. vermelden de bruikbaarheid van CT scan in rampsituaties. Zij stellen voor om mobiele units in te zetten bij dergelijke aangelegenheden, als hulp voor het disaster victim identification team (DVI). (1) Ruder et al. gebruiken CT scans van paranasale sinussen om slachtoffers van rampen te identificeren. Röntgenopnames van de schedel worden, zoals hierboven beschreven, al langer gebruikt. Door de lage klinische bruikbaarheid van deze opnames worden zij echter slechts nog in uitzonderlijke gevallen uitgevoerd. Er een shift naar het nemen van CT scans van het hoofd bij zowat alle pathologie aangaande het hoofd: hoofdtrauma, hoofdpijn, sinonasale ziektes,... De forensische radiologie kan dus niet achterblijven. Er werden methodes ontwikkeld om CT scans te kunnen vergelijken met radiografiën. De CT scan werd voor het eerst geïmplementeerd door een DVI team tijdens de bosbranden in Victoria, Australië. CT werd toen gebruikt om menselijke van niet-menselijke restanten te onderscheiden, om

geslacht te bepalen, leeftijd te schatten en relevante bevindingen die konden helpen bij de identificatie op te lijsten. In de studie van Ruder et al. werden ante en post mortem CT scans van de paranasale sinussen visueel vergeleken. Er werd onderzocht of dit een betrouwbare methode was om slachtoffers te identificeren in geval van een rampscenario. Deze techniek zou dan kunnen dienen als een extra hulpmiddel voor het DVI team. Men kon besluiten dat dit inderdaad een betrouwbare methode was, ongeacht de leeftijd, doodsoorzaak of staat van ontbinding van het slachtoffers. Niet alleen de frontale sinus, maar ook de sfenoidale sinus is uiterst geschikt voor identificatie omwille van de individuele variatie. De sfenoidale sinus is moeilijk te bekijken op een radiografie. Multiplanaire reformatting maakt het mogelijk om gelijk welke post mortem CT scan te oriënteren en te corresponderen met een ante mortem CT beeld. Dit is niet mogelijk met radiografie. De auteurs onderschrijven het standpunt van Owsley, namelijk dat zelfs gefragmenteerde sinussen gebruikt kunnen worden. Er zijn in deze studie geen valse identificaties gebeurd, ongeacht of de identificatie gedaan werd door een radioloog of niet-radioloog. De radiologen vertoonden wel een significant hogere sensitiviteit. (7) Voor een voorbeeld verwijst ik u graag naar bijlage 3.

1.5. Cel Vermiste Personen en Disaster Victim Identification Team van de Federale Politie België

De Cel Vermiste Personen is een onderdeel van de (Algemene Directie van de) Federale Gerechtelijke Politie. Meer bepaald is zij een deel van de Dienst Aggressie van de Directie van de Bestrijding van de Criminaliteit tegen Personen. Zij zijn een gespecialiseerde operationele steundienst van de Federale Politie die coördinatie, steun en expertise verzekert in het geval van onrustwekkende verdwijningen en wanneer men niet-geïdentificeerde lichamen of lichaamsdelen en amnesiepatiënten vindt. (8) De taak van de Cel is dus niet om de doodsoorzaak te achterhalen. Dit is een zaak voor het parket, waarbij de desbetreffende magistraat kiest welke stappen er gezet worden.

Aangezien identificatie behoort tot de hoofddoelen van de Cel achtte ik het interessant om meer informatie te proberen verkrijgen omtrent hun werkwijze. Meer bepaald wou ik op zoek gaan naar het al dan niet gebruiken van forensische radiologie in dit verwerkingsproces. In het kader van mijn masterproef kreeg ik de mogelijkheid om een bezoek te brengen aan de Cel Vermiste Personen en het Disaster Victim Identification Team (DVI) van de federale politie te Brussel. Op donderdag 28 april 2011 sprak ik aldus met de heer Alain Remue, de heer Patrick Maes en mevrouw Lucrèce Renard. Uit wat zij mij vertelden en

de informatie die ik verkreeg, kon ik verschillende zaken leren die ik hieronder zal bespreken. De vragen die ik gebruikte om het gesprek min of meer gestructureerd te laten verlopen vindt u in bijlage 4.

Momenteel werkt de Cel met twee afzonderlijke experten-databanken. Dit is enerzijds de databank “vermistte personen”, anderzijds de databank “niet-geïdentificeerde lichamen”. In deze databanken bevindt zich ante mortem en post mortem informatie. Deze gegevens worden door middel van de “DVI international” software vergeleken op zoek naar meerdere linken. De ante mortem informatie wordt bij de familie van het slachtoffer ingewonnen door een gekwalificeerd lid van de DVI samen met een lokale onderzoeker. De post mortem gegevens worden aangeleverd door het DVI en forensische experten. (8) In deze databanken worden ook relevante medische gegevens en ante mortem radiologische beelden, van gelijk welke aard, opgenomen. Indien dit niet kan om privacy redenen, creëert men een spoor dat aanduidt dat deze informatie bestaat. Deze medische gegevens kunnen dan door de onderzoeksrechter indien nodig worden opgevraagd, waarbij hij of zij het medisch geheim opheft. De informatie uit de databases, dus ook de radiologische gegevens, wordt via de kanalen van Interpol internationaal verspreid. Men gelooft in de theorie dat de meeste lichamen die niet geïdentificeerd kunnen worden, gelinkt zijn aan vermiste personen uit het buitenland. Vandaar dat internationale samenwerking zeer belangrijk is.

Het aantal niet-geïdentificeerde lichamen in België wordt geschat op ± 150 . Het is echter de uitzondering dat geen naam geplakt kan worden op een lichaam. In het proces van identificatie maakt men gebruik van tijdsvorken, algemene lichaamskenmerken, kledij, onderzoek van het gebit, DNA onderzoek,... Het DVI doet beroep op wetsdokters voor de autopsie. Zij maken samen het post mortem verslag op. Het is dus niet steeds dezelfde persoon die het onderzoek uitvoert en het gebeurt niet steeds in hetzelfde instituut. Hoe de autopsie verloopt is niet gestandaardiseerd. De wetsdokter oordeelt zelf wat hij of zij nodig acht te onderzoeken in een bepaald geval. Het DVI kan hierbij steeds een voorstel doen om een bepaald onderzoek extra uit te voeren. Zo wordt niet bij iedere autopsie routinegewijs een röntgenfoto van het gebit of het hele lichaam genomen. De mensen van het DVI kunnen wel vragen om dit te doen wanneer dit nog niet gebeurd is, indien zij een aanwijzing hebben dat dit nuttig zou zijn ter identificatie. Het kan dus gebeuren dat een RX of CT scan nog gemaakt wordt nadat de autopsie reeds heeft plaatsgevonden, wanneer men bijvoorbeeld achteraf een bepaalde botpathologie wil aantonen. Wat wel of niet gedaan wordt tijdens een autopsie hangt voor een stuk ook af van de werkdruk, en dus de tijd, die een wetsdokter heeft om een bepaald lichaam te onderzoeken. Virtuele autopsie wordt tot nu toe nog niet toegepast. Het bestaan van deze techniek en de mogelijkheid tot implementatie is jongstleden wel voorgesteld op een bijeenkomst.

De meest gebruikte vorm van forensische radiologie bij identificatie is de forensische odontologie. Hierbij zoekt men een match tussen een röntgenfoto van het gebit post mortem en de tandartsgegevens van de vermiste persoon ante mortem. De succesrate van deze techniek is om en bij de tachtig procent. Men hecht dus veel belang aan deze manier van werken. Het is mogelijk om alleen op basis van matchende beelden van het gebit de persoon te identificeren. Dit is echter zelden het geval voor andere radiologische links, zoals een bepaalde botpathologie of andere afwijking. De mogelijkheid tot puur radiologische identificatie is vooral afhankelijk van de specificiteit van de link. Meestal is de match niet specifiek genoeg en doet men, om absoluut zeker te zijn, in zo'n gevallen bijna steeds een DNA onderzoek.

Het disaster identification team heeft de mogelijkheid om CT of MRI scans te laten uitvoeren. Aangezien de forensische instituten niet beschikken over de nodige toestellen, dient men hiervoor een beroep te doen op de ziekenhuizen in de desbetreffende omgeving. Vaak is het moeilijk om de radiologische dienst te overtuigen van het hoe en waarom van deze onderzoeken in het kader van een identificatie. Argumenten tegen het toelaten van een lijk in een CT of MRI scanner die gebruikt wordt in klinische setting, is onder meer de drukke bezetting van deze toestellen en de mogelijke besmettelijkheid van de lichamen. Het kan dus heel wat onderhandeling en overredingskracht vergen om deze beeldvorming te bekomen.

Er wordt ook beroep gedaan op het DVI in rampsituaties met dodelijke slachtoffers. Het team gaat pas ter plaatse als alle overlevenden weggebracht zijn. Dan brengen zij alle lichamen en lichaamsresten naar een tijdelijk mortuarium (VMP) op het terrein van de ramp. Het lichaam dat eerst gevonden wordt, krijgt nummer M1, het tweede M2, enzovoort. In deze volgorde wordt gezocht naar de identiteit van de slachtoffers. Men kiest er dus niet voor om te starten met de minst gehavende lichamen. De identificatie gebeurt niet op basis van visuele herkenning of identiteitskaarten die gevonden worden op het lichaam. Hierdoor zijn in het verleden soms fouten gebeurd. De autopsie van de slachtoffers wordt niet ter plaatse uitgevoerd, hiervoor worden de lichamen overgebracht naar forensische instituten.

Het is een doel van het disaster victim identification team om bij een ramp alle, of zoveel mogelijk, slachtoffers te kunnen scannen met CT om de identificatie te vergemakkelijken. Zij zijn hierin tot nu toe nog niet geslaagd. Bij de treinramp in Buizingen hebben zij een poging gewaagd. Er was echter geen mogelijkheid om gebruik te maken van CT scanners uit de klinische setting, omwille van bijvoorbeeld de angst voor contaminatie van de installatie en andere redenen. Naar aanleiding van deze ramp is men echter een overleg kunnen starten met de universiteit en het ziekenhuis van Leuven. De mogelijkheid wordt

onderzocht om in de toekomst een samenwerking op te zetten tussen het DVI en de dienst die zich bezighoudt met forensic imaging.

In het verleden heeft de DVI al onderzocht of het mogelijk is om een centrale unit op te richten die zich, onder andere, bezig kan houden met forensische radiologie. Hier zouden dan qua beeldvorming alle nodige toestellen aanwezig zijn, zoals RX , CT en MRI. Deze optie is echter te duur, er is geen budget om dit te verwezenlijken. Het DVI is bijgevolg steeds geïnteresseerd om contact te kunnen leggen met instituten die willen samenwerken op dit vlak.

Wat betreft het bijhouden van ongeïdentificeerde lichamen of lichaamsresten is er geen wettelijk kader. Het is de desbetreffende magistraat die beslist hoe lang een lijk bewaard wordt. Een niet-geïdentificeerd lichaam wordt echter nooit verbrand, men begraaft de slachtoffers. Dit wordt gedaan opdat wanneer een lichaam alsnog geïdentificeerd kan worden, het achteraf, indien gewenst, teruggegeven kan worden aan de familie. Wanneer een lichaam begraven wordt, bewaart men vaak DNA stalen en het gebit.

2. Wat is de doodsoorzaak?

2.1. The Virtopsy® Project: doelstelling

Het Virtopsy® project is ontstaan aan de universiteit van Bern. Het heeft in se als doel een revolutie in de forensische wereld teweeg te brengen, door van de historische autopsie zoals we die allen kennen over te schakelen op een minimaal invasieve autopsie via radiologische weg. De opzet van het project wordt door de onderzoeksgroep zelf als volgt uiteen gezet op hun site www.virtopsy.com :

« The Virtopsy® research project builds on a unique logistical structure: due to the close cooperation of the main researchers with differing research focuses, the project aims at five goals:

- The implementation of radiological digital imaging methods (Multislice - Computed Tomography/MSCT and Magnetic Resonance Imaging/MRI) as main diagnostic tools in forensic pathology, ultimately leading to "minimally invasive autopsy" analogous to "keyhole surgery" in clinical medicine.
- With use of imaging techniques (CT and MRI), photogrammetry and three-dimensional optical measuring techniques, a reliable, accurate geometric presentation of all forensic findings (the

body surface as well as the interior) should be achieved. With this technology, exact forensic-medical reconstructions can be performed.

- The application of photogrammetry and 3D surface scanning in forensic reconstruction in addition to radiological imaging techniques as well as the development of biomechanical models.
- Producing and validating of a post-mortem biochemical profile by means of MR-Spectroscopy to estimate, for example, the time of death.
- The implementation of an imaging database as a technical basis of a "center for competence in virtual autopsy".

Virtopsy® is an applied research project which has created a foundation for extensive innovations (e.g., replacing standard autopsy with minimally invasive procedures) in many areas of forensic pathology. The multi-disciplinary project involves forensic sciences, diagnostic imaging, magnetic resonance spectroscopy, computer sciences and telematics as well as biomechanics. Not only significant scientific results, but also economic returns are expected. Advancements in the acquisition, documentation and interpretation of morphological findings in forensic pathology will lead to an increase in the value of forensic - pathologic evidence in court.

The virtual autopsy project intends to revise the technical procedure of the standard autopsy (dissection of a human body), with the goal in mind of newly defining protocols for: (1) the utilization of modern radiological imaging, and (2) currently accepted incision sites for invasive tissue removal (the development of a minimally invasive autopsy). The results will also be used in clinical forensic medicine (reporting findings relevant to the medico-legal expert for the living) which will provide the basis for a systematic quality control/quality accreditation program for morphological forensic medicine.

The material goal, thereby, should be to create an implementation manual which clearly explains indication, preparation, procedure and interpretation as well as evaluation of Virtopsy® methods in forensic medicine. » (9)

2.2. Technische apparatuur en onderzoeksmethodiek van het Virtopsy® project

De onderzoeksgroep maakt gebruik van volgende radiologische technieken:

- 3D photogrammetry-based optical surface scanning
- Computed Tomography (CT) en Magnetic Resonance Imaging (MRI)
- Post mortem biopsie
- Post mortem angiografie

De technische opstelling waar zij mee werken, werd de Virtobot® genoemd. Dit bestaat uit een Siemens Somatom 6 met fluoscopy pack en twee externe Leonardo werkstations die verbonden zijn met een netwerk. De surface scanning gebeurt met de GOM ATOS III 3D digitizer, welke gemonteerd is op de robotarm. Ook de biopsiemodule is op de Virtobot® geplaatst. De positionering van de naald gebeurt via het optisch chirurgisch navigatiesysteem Polaris. Een hart-long machine wordt gebruikt voor post mortem CT angiografie. Er wordt gebruik gemaakt van een Siemens Magnetom/Symphony MRI toestel met een Total imaging matrix (TIM) van 1,5 Tesla. (9)

Een volledige beschrijving van de werking van de Virtobot® zou ons te ver leiden binnen het bestek van deze masterproef. Voor de verhandeling van de werking van deze opstelling verwijs ik u graag naar bijlage 5. Dit is het integrale artikel “Virtobot – a multifunctional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy”. (10) Voor afbeeldingen van de Virtobot® zoals deze vandaag opgesteld staat in de universiteit van Bern verwijs ik u naar bijlage 6. (9) Hieronder beschrijf ik echter wel kort enkele nieuwe modaliteiten die een ware revolutie betekenen op het gebied van virtuele autopsie.

Een gedetailleerd beeld van het volledige vasculaire systeem is zo goed als onmogelijk met klassieke autopsie. De conventionele technieken tonen namelijk enkel de grote vaten aan. Een bloeding uit een kleiner vat kan dus niet gedetecteerd worden. Dit kan echter van belang zijn voor medico-legale aspecten. In het kader van het Virtopsy® project werd getracht een post mortem angiogram te bewerkstelligen. De techniek bestaat uit het perfunderen van de vaten met paraffine olie. Hiermee tracht men de post mortem ontstane klonters en het overblijvend bloed weg te spoelen. Nadien wordt een lipofiel middel in bolus ingespoten. Deze olie is geiodiseerd en sterk opaak (≈ 2000 HU). Ze blijft in de vaten voor minstens 72 uur zonder het optreden van extravasatie, wat belangrijk is om het ontstaan van artefacten tegen te gaan. Door het verhogen van de viscositeit van de olie wordt het capillair systeem uitgesloten als gevolg van micro-embolisatie. Aangezien er post mortem uiteraard geen bloedcirculatie meer is, wordt het contrastmiddel rondgepompt met een gemodificeerde hart-long machine. (11) Het hele proces neemt ongeveer een uur in beslag. (12) In de studie van Grabherr et al. visualiseerde men de onderste ledematen met een anterograde perfusie van de arteriën en de bovenste ledematen met een retrograde perfusie van het veneuze systeem. Met deze techniek is het mogelijk om het vasculair systeem tot op het niveau van de smalle vaten te tonen. Grabherr et al. zijn er zelfs in geslaagd om een veneus injectieteken aan te tonen, wat een aanwijzing was voor druggebruik van het slachtoffer in se. Het uitvoeren van een post mortem angiografie zal in de toekomst zijn nut kunnen bewijzen in het onderzoek naar steek- en schotwonden, aantonen van aneurysma's en andere bronnen van bloeding. Verder kan men geruptureerde venen bij shaken baby syndroom aantonen en op zoek gaan naar occlusies in gevallen van plotse cardiale dood. Tot

slot zal het mogelijk zijn om, via bepaling van lekkage van contrastvloeistof in een bepaalde tijdsspanne, bloedverlies te quantificeren. (11)

Histologische weefselveranderingen zijn van zeer groot belang bij autopsie. Vooral in het kader van het zoeken naar de oorzaak van een natuurlijke dood is deze informatie van onschatbare waarde. De CT scanners en MRI van de dag van vandaag zijn niet in staat om histologische informatie te verschaffen. Bolliger et al. onderzochten de mogelijkheid om via een minimaal invasieve methode, CT gecombineerd met biopsie, dezelfde histologische gegevens te komen als bij klassieke autopsie in het geval van natuurlijke dood. De biopsie wordt genomen onder CT fluoroscopie controle. Er werd gebruik gemaakt van een Bard Magnum biopsy gun en een 14 gauge UltraCORE biopsienaald. Het hart en de longen werden bij iedere patiënt gebiopsieerd, verder onderzocht men ook verdachte regio's. De hele biopsieprocedure nam tussen een paar minuten en een half uur in beslag. Ter controle werd vervolgens een conventionele autopsie uitgevoerd. De resultaten waren opmerkelijk vergelijkbaar, namelijk in negentig procent van de gevallen (in totaal 20) kwam men tot dezelfde conclusie. Slechts in enkele gevallen werden er zaken gemist door de sampling. De combinatie van CT, CT angiografie en biopsie kan dus in theorie concurreren met de klassieke autopsie. Men is er zich van bewust dat incidentele bevindingen gemist zullen worden indien zij niet zichtbaar zijn macroscopisch of op CT beeld. Dit is enkel te voorkomen wanneer men routinematig alle organen zou onderzoeken. Deze optie is echter niet haalbaar met post mortem biopsie. Dit is wel het geval bij conventionele autopsie, die trouwens sneller kan gebeuren dan de post mortem biopsie, wat de superioriteit van deze techniek onderstreept. Zij stellen dat de sampling beter zou kunnen verlopen indien pathologen en radiologen hiervoor samenwerken. Bolliger et al. onderstrepen in ieder geval het potentieel van deze nieuwe techniek en wijzen op het grote veiligheidsvoordeel voor pathologen in het geval van infectieuze ziekten. (12)

Bij levende personen zijn de longen geventileerd. Tijdens post mortem CT scanning zijn de longen gedeeltelijk gecollabeerd. Dit zorgt ervoor dat kleine bevindingen zoals nodules gemist kunnen worden. Tevens is het moeilijk om een verschil te maken tussen normale post mortem veranderingen en relevante pathologie. Om dit te verhelpen werd door Germerott et al. onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van post mortem CT scanning met geventileerde longen. Zij maakten gebruik van een mechanische ventilator met een druk van 40 mbar. De ventilatie gebeurde met een endotracheale tube, een larynxmasker en een CPAP masker (in geval van rigor mortis). De ventilatie leidde tot een duidelijke daling van de densiteit en mat glas attenuatie van de longen. Het beeld van de geconsolideerde gebieden bleef ongewijzigd. Pathologische veranderingen zoals septale verdikking en nodules in het longparenchym werden beter detecteerbaar. Deze methode lijkt ook nuttig te zijn om een differentiatie te maken tussen geconsolideerde

gebieden die niet geventileerd kunnen worden en vochtcollecties in het longparenchym die verminderen als gevolg van ventilatie. Aangezien de mat glas attenuatie daalde, is het volgens de onderzoekers van cruciaal belang om eerst een CT scan zonder ventilatie uit te voeren. Dit om deze informatie niet verloren te laten gaan in het ventilatieproces. De ventilaties werden telkens maximum twintig minuten uitgevoerd, waarbij geen iatrogene veranderingen zichtbaar waren. Er kan echter nog niet uitgesloten worden dat deze methode histologische schade uitlokt. Dit is het onderwerp van verder onderzoek. (13)

2.3. Algemene voor- en nadelen van CT – MRI - klassieke autopsie

CT scanning is zeer interessant voor alle soorten botpathologie. Zo is het zeer makkelijk om fracturen, schotwonden en dergelijke te documenteren op een manier die voor leken begrijpelijk is. Verder is het mogelijk om kleine fracturen te detecteren op plaatsen van het lichaam die moeilijk bereikbaar zijn of die makkelijk over het hoofd gezien worden. Ook lichaamsdelen die normaal gezien niet geautopsieerd worden, kunnen onderzocht worden op zoek naar botpathologie. Zo kan men het faciaal skelet onderzoeken op niet-invasieve manier, zonder de nabestaanden voor het hoofd te stoten door verminking van het aangezicht. MR beeldvorming is bovenal uitermate geschikt voor het onderzoek naar pathologie van het subcutane vetweefsel. (14)

Röntgenstralen worden routinematig gebruikt voor het onderzoek naar de aanwezigheid van vreemde lichamen. Met CT kunnen deze objecten tevens exact gelokaliseerd worden, wat de extractie bij autopsie makkelijker laat verlopen. Via meting van Hounsfield Units kan ook de radiologische densiteit van deze voorwerpen bepaald worden, wat een stap in de richting van hun samenstelling kan betekenen. (14)

Wanneer een lichaam geïdentificeerd moet worden, kan 3D data omgezet worden naar 2D projecties of tomografische zichten. Een belangrijke toepassing hiervan is het creëren van 2D beeldvorming van het gebit dat vergeleken kan worden met ante mortem gegevens. (14)

Een groot nadeel van CT is dat vreemde lichamen en gas een lage contrast resolutie hebben in de zachte weefsels. Dit in tegenstelling tot MR beeldvorming waarbij corticaal bot slechter zichtbaar is. Vreemde lichamen in harde materialen worden vaak als artefacten gezien op de beelden. Er is echter geen sprake van problemen met ferromagnetisch materiaal bij MR, aangezien de voorwerpen meestal niet ferromagnetisch zijn van aard. Door het feit dat er aan de universiteit van Bern geen gebruik wordt gemaakt van parallel imaging, duurt de whole body MR minstens één tot enkele uren (3,5 uur). Men

probeert om in de toekomst wel gebruik te maken van deze parallel imaging met meerdere geïntegreerde coils en acquisitiekkanalen om de onderzoeksduur gevoelig terug te dringen. (14)

Het feit dat er geen bloedcirculatie is bij overledenen maakt dat technieken waarbij contrast ingespoten wordt niet toegepast kunnen worden. Dit wordt echter aangepakt met de nieuwe techniek van post mortem angiografie zoals hierboven beschreven. Er is sprake van twee technieken. Ofwel maakt men gebruik van contrast injectie via catheters, ofwel gebruikt men een hart-long machine om een post mortem circulatie te creëren. Met deze technieken is het vasculair systeem beter zichtbaar dan met een klassieke autopsie. (14)

Een laatste nadeel is dat de medische beeldvorming tot nog toe niet in staat is om microscopische pathologie aan te tonen. Onderzoek met micro-CT en micro-MR probeert dit probleem te verhelpen. De spatiale resolutie kan met deze technieken gebracht worden tot op submillimetrisch niveau. Uiteraard is het voor deze beeldvorming nodig om weefselstalen te genereren, waardoor het niet-invasieve karakter van virtuele autopsie vervalst. Doch men kan de virtuele autopsie op een minimaal invasieve manier bewerkstelligen. De stalen kunnen gebiopsieerd worden via CT geleide. (14)

Pneumothorax en gasembolie zijn moeilijk te diagnosticeren bij autopsie. Daarenboven kan de hoeveelheid lucht niet gemeten worden en wilt de aanwezigheid van lucht in de hartkamers niet automatisch zeggen dat er sprake is van een embolie. Met CT kan men gas detecteren en de hoeveelheid berekenen. Natuurlijke doodsoorzaken, zoals een aritmogeen cardiaal arrest, zijn moeilijk te bepalen met virtuele autopsie. Dit is echter ook het geval bij autopsie. Het post mortem interval is ander belangrijk gegeven dat moeilijk te bepalen is met de klassieke autopsie. De snelheid van decompositie hangt af van zeer veel verscheidene factoren. MR spectroscopie biedt hier een nieuwe mogelijkheid door het meten van de relatieve concentraties van bepaalde aminozuren in de hersenen. (14)

2.4. Kostprijs?

De gangbare prijzen in onderzoekscentra in België zijn als volgt: \pm 500 euro voor whole body CT scan, \pm 600 euro voor whole body MRI, \pm 200 euro voor biopsie, \pm 700 à 800 euro voor angiografie. Er zijn geen gekende prijzen voor 3D surface scanning. We kunnen dus stellen dat een virtuele autopsie, op zijn minst, om en bij de 2000 euro kost. (15)

2.5. Algemene bevindingen

2.5.1. Hersenen

Trauma of typisch ischemische letsels geven vaak gestegen intracranieële druk. Dit vertaalt zich in een transtentoriale herniatio van de temporale lobe of herniatio van het cerebellum in het foramen magnum, waarbij het foramen een impressie achterlaat op het cerebellum. Post mortem beeldvorming toont grote pathologiën die de oorzaak kunnen zijn van deze gestegen intracranieële druk. De radiologie is vooral zeer van toepassing wanneer er sprake is van vergevorderde decompositie, wat autopsie van de hersenen na het openen van de schedel onmogelijk maakt. Een anatomisch overzicht wordt in dat geval geleverd door post mortem MRI. Een belangrijke kanttekening is dat er te weinig sensitiviteit is met een 1,5 Tesla MR toestel in het geval van hersenpathologie die kleiner is dan vijf millimeter. Dit kan echter verholpen worden door de veldsterkte te verhogen. In de toekomst zouden de tekortkomingen van cross-sectionele beeldvorming in het geval van kleine hersenlaesies in vitaal belangrijke gebieden in de toekomst aangepakt worden. (1)

Verder zijn er meerdere niet specifieke tekens te vinden. Zo is er een verlies van corticomedullaire differentiatie als gevolg van oedeemvorming door post mortem hypoxie. Bij CT scans daalt het verschil in attenuatie tussen cortex en medulla snel, in tegenstelling tot de MR beeldvorming waarbij de differentiatie langer duidelijk blijft. Zo is het zelfs na enkele weken mogelijk om hersenstructuren van mekaar te onderscheiden bij drenkelingen. De oedeemvorming zorgt ook voor het zwellen van de hersenen wat zichtbaar is als vernauwde sulci, cisternen en ventrikels. Ook bij oedeem kan er sprake zijn van tonsillaire herniatio, zoals bij ischemische letsels. De sedimentatie van het bloed post mortem zorgt ervoor dat het bloed klontert en meer hyperdens wordt. Hierdoor wordt bijvoorbeeld de posterieure sagittale sinus helderder op CT scan, omdat wanneer het slachtoffer neer ligt er meer bloed in deze sinus stroomt. Een hyperdense sagittale sinus is echter ook een teken voor een veneuze sinusthrombose, waardoor verder onderzoek met contrast nodig is om de juiste diagnose te kunnen stellen. (16)

Enkele specifieke post mortem bevindingen worden tevens genoemd. Bij intracranieële hemorragie is er geen verschil bij virtuele autopsie ten opzichte van klinische beeldvorming. Bij CT scan is het bloed hyperdens ten opzichte van het hersenweefsel, bij MR beeldvorming is het beeld afhankelijk van de concentratie hemosiderine. De omzetting van hemoglobine naar hemosiderine is tijdsafhankelijk. MRI kan dus gebruikt worden om te bepalen hoe oud een ante of peri mortem bloeding is bij een overledene. Het aantonen van een cerebraal infarct is zeer moeilijk post mortem. Wanneer het slachtoffer onmiddellijk sterft na het infarct hebben de hersenen niet de tijd om meer oedeem te creëren dan er reeds sowieso

gemaakt wordt post mortem. Een CT scan kan dus enkel een beroerte aantonen wanneer er sprake is van asymmetrische hypodense delen in de hersenen, wat aantoont dat de persoon nog enkele uren geleefd heeft na de stroke. MRI kan slechts moeilijk een beroerte aantonen, aangezien de hersenen reeds na een half uur volledig ischemische tekens vertonen. Op dit vlak is er de mogelijkheid om met MR spectroscopie dit probleem te omzeilen. In de toekomst dient dit verder onderzocht te worden. (16) Jackowski et al. tonen aan dat MRI echter in staat kan zijn om de hersenstructuren vrij goed aan te tonen bij lijken in staat van ontbinding. De klassieke autopsie kan in dit geval geen uitweg bieden. Ook dit dient in de toekomst verder uitgewerkt te worden. (17)

2.5.2.Hart

Hartproblematiek komt vaak tot uiting op post mortem beeldvorming als een hemothorax of pericardiale tamponade. Als gevolg van craniale traumata, bijvoorbeeld kogelwonden in het hoofd en steekwonden in de nek, is rechter ventriculair falen na een veneuze luchtembolie een belangrijke hartgerelateerde doodsoorzaak. Visualisatie van een embolie, evenals quantificatie van een luchtembolie, is mogelijk dankzij 3D beeldvorming na post mortem CT scanning. (1)

Post mortem MRI, op zijn beurt, zou de leeftijd van een hartaanval kunnen bepalen. (16) Jackowski et al. toonden deze infarctleeftijd aan op basis van signaalintensiteit. Hun studie omvatte echter slechts acht personen, het is dus niet mogelijk om belangrijke conclusies te trekken. Verder onderzoek om deze bevindingen te bevestigen is zeker aan de orde. (18)

2.5.3.Longen

Een pneumothorax is post mortem makkelijk te herkennen. Pulmonair oedeem heeft post mortem dezelfde kenmerken op CT scan als in de klinische setting. Men ziet dan de vooral verhoogde mat glas attenuatie. Op MR beeldvorming is er sprake van een verhoogde signaalintensiteit. Een pneumonie geeft dezelfde karakteristieken op beeldvorming als pulmonair oedeem. Bloedsedimentatie in de longen (interne livores) kan soms voor een pneumonie van de dorsale longvelden gehouden worden, door de sterk gelijkende beeldvorming. (1) Livor mortis in de long kan best bekeken worden op CT. Men ziet dan een mat glas opaciteit in de posterieure loben met een horizontale demarcatielijn ten opzichte van de anterieure lobe met het uitzicht van een lucht-bloed niveaubehoud. Het is lastig om het verschil te maken tussen interne livor mortis en aspiratie of contusie. Longlaceraties, pneumomediastinum en fracturen van

sternum of ribben zijn makkelijk te herkennen op CT. Atelectase is beter zichtbaar wanneer men gebruik maakt van contraststof. Instillatie van contrast is tevens handig om pulmonaire embolen aan te tonen. (16)

2.5.4. Systemische bevindingen

Verschillende pathologiën geven verschillende karakteristieken. Zo is er bij hypothermie sprake van bloedingen in de spieren als typische en indicatieve bevinding. Fatale hemorrhagie vindt men dan weer in het geval van traumata met bijvoorbeeld scherpe voorwerpen. Hierbij vindt men geen indicatieve maar subjectieve karakteristieken. Deze zijn groot bloedverlies rond de verwonding en bleke interne organen, waarbij subendocardiale bloedingen aantonen dat de hemorrhagie dodelijk was. Om deze diagnose bij te treden kan men post mortem via beeldvorming een quantificatie doen van het overblijvende bloed in de grote bloedvaten. (1)

Een algemeen hyperdense aortawand is waarschijnlijk een teken van dilutie van het bloed na massieve infusie van vocht bij reanimatie of sedimentatie van bloed weg van de aorta. Wanneer de densiteit in de aortawand gelokaliseerd is van aard heeft men eerder te doen met een arteriosclerosehaard. Een “vanishing aorta” is vaak aan te tonen bij een fatale bloeding, de grote vaten vallen toe. Men kan dit ook zien ter hoogte van de pulmonaire arteriën, venae cava en hartkamers. Een aortaruptuur was tot voor kort moeilijk aan te tonen. Door de komst van de post mortem angiografie is dit probleem van de baan. (16)

Anemie kan op CT scan afgeleid worden uit de densiteit van het bloed. Hoe minder hemoglobine, hoe minder dens het bloed wordt. Een bloeddensiteit in het rechter atrium lager dan 55 Hounsfield Units is suggestief voor anemie. Verdere studies zijn nodig omtrent de grootte van het hart post mortem. Het rechter atrium is namelijk vaak gedilateerd na overlijden, wat de totale hartgrootte hoogstwaarschijnlijk zal beïnvloeden. (16)

Een belangrijke mogelijkheid in de beeldvorming is het meten van het gewicht van de organen via volume imaging. Het volume dat men hiermee radiologisch meet, wordt vermenigvuldigd met de weefseldensiteitsfactor van het desbetreffende orgaan. (1)

2.5.5. Abdominale organen

CT scans van de abdominale organen hebben een lage sensitiviteit en specificiteit voor pathologie en zijn beter van kwaliteit na instillatie van contrast. De structuren en pathologiën zijn dan beter zichtbaar. MR beeldvorming detecteert dankzij de T2 sequenties heel goed oedemateuze pathologie. De detectiegraad voor een leverlaceratie is slechts vijftig procent bij post mortem CT, de detectiegraad voor miltlaceraties is nog lager. Specifiek onderzoek omtrent dit onderwerp is nodig in de toekomst. (16)

2.5.6. Specifieke forensische bevindingen

Post mortem begint de bacteriële decompositie. Als eerste treedt er weefselschade en gasformatie op. Deze ontbinding tast het hele lichaam aan en start vooral ter hoogte van het hepatobiliaire systeem. Het meeste gas stapelt zich op intravasculair, intrabiliair of ter hoogte van weefselaflijningen. In tegenstelling tot de luchtembolie is de gasopstapeling bij decompositie diffuus. (16)

2.6. Steek- en schotwonden

Post mortem radiologie is een zeer handige tool om de locatie van een projectiel aan te duiden. Dit helpt om de kogel en eventuele fragmenten makkelijk terug te vinden. Het kan de afgelegde weg van de kogel voorstellen, wat belangrijk is bij de reconstructie van de plaats delict. Het kan tevens helpen om het type wapen dat gebruikt werd te identificeren. Radiografie is tegenwoordig wijdverspreid gebruikt in deze gevallen. Het heeft echter één groot nadeel, namelijk de beelden zijn slechts tweedimensionaal. Er moeten dus telkens twee opnames genomen worden. Andenmatten et al. onderzochten daarom de mogelijkheid van CT scan bij slachtoffers van schietpartijen. Zij konden besluiten dat deze beeldvorming in staat was dezelfde antwoorden te geven als klassieke autopsie wat betreft ingang- en exitwonden, locatie van kogel en fragmenten, afgelegde weg en gerelateerde verwondingen. Er werd enkel een verschil gevonden bij bepaling van doodsoorzaak. Alle verschillen werden gevonden bij slachtoffers die een kogel door het hoofd kregen. De autopsie bepaalde dat zij stierven als gevolg van hemorrhagie en luchtembolie. De CT beelden legden de doodsoorzaak vast op een centrale respiratoire paralyse door het grote karakter van het geraakte gebied. Zij stellen tevens dat CT scan van groot nut kan zijn in het geval van verminkte lijken, zoals bij verbrande of sterk decomposerende lichamen, waarbij het moeilijk is om ingang- en uitgangswonden te diagnosticeren bij externe inspectie. Verder halen zij aan dat MRI zijn nut kan bewijzen

wanneer de tractus van de kogel niet makkelijk zichtbaar is, wegens de eigenschap om zacht weefsel duidelijker te visualiseren. (19)

Ingangs- en uitgangswondes van mekaar onderscheiden en de richting van het schot bepalen, gebeurt aan de hand van verschillende eigenschappen. Zo toont een kegelvormig botletsel de richting aan van het schot, wat zeer belangrijk is wanneer het zachte weefsel hieromtrent geen aanwijzingen kan geven. De regel van Puppe kan de chronologische volgorde van fracturen bepalen. Dit houdt onder andere in dat nieuwe fracturen zullen stoppen met uitbreiden wanneer zij een oude fractuur bereiken. (1)

Bij conventionele autopsie is het onderzoek van steekwonden zeer tijdrovend. Men moet het omliggende weefsel laag per laag dissecteren om de richting van de steekwonde te kunnen aantonen. Tijdens dit proces kunnen omliggende structuren beschadigd worden die het wondkanaal aantasten. Er kan ook gebruik gemaakt worden van een andere methode die inhoudt dat een probe, gelijkend aan het steekvoorwerp, ingebracht wordt. Dit houdt echter het risico in dat er interne structuren beschadigd worden en dat er aanwijzingen verplaatst worden. Daar komt nog eens bij dat luchtembolie, wat vaak aanzien wordt als een belangrijk teken bij steekwonden, moeilijk te diagnosticeren is via conventionele autopsie. Dit is echter geen probleem bij CT beeldvorming. Schnider et al. onderzochten de mogelijkheid om CT toe te passen op slachtoffers van steekpartijen. Zij trachtten een antwoord te vinden op volgende vragen: detectie van vreemde lichamen, wondkanaal, skeletale verwondingen en orgaanverwondingen en de doodsoorzaak bepalen. Men kon besluiten dat sterk gegroepeerde steekwonden gemist konden worden. Ook superficiële wonden werden frequent gemist. Er wordt dus gesteld dat post-mortem CT de externe examinatie niet kan vervangen. CT was wel in staat om de laesies van hart, longen, hersenen, milt en skelet aan te duiden. Zij stellen post mortem CT voor als hulp om de autopsie te plannen, door het aantonen van bepaalde regions of interest. (20) Steekwonden in zacht weefsel aantonen is moeilijk met CT. Bolliger et al. hebben aldus recent onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om steekkanalen aan te tonen met contrast bij CT scan. In een pilootstudie instilleerden zij Lipidol Ultra contraststof in experimenteel geïnduceerde steekwonden bij varkens. Hierna voerden zij een CT scan uit. Zij stellen dat zeer duidelijke, voor leken begrijpelijke, beelden verkregen konden worden. De lengte van het kanaal kon met software exact berekend worden. Men is er van overtuigd dat deze methode ook toegepast kan worden op levende en overleden slachtoffers van steektraumata. Dit dient verder onderzocht te worden. Voor beeldinformatie verwijs ik u graag naar bijlage 7. (21)

2.7. 3D reconstructie van verkeersongelukken met voetgangers of fietsers

Tot een aantal jaar geleden (\pm 2005) was de forensische radiologische beeldvorming vooral van tweedimensionale aard. Sindsdien zijn er inspanningen gedaan om nuttige driedimensionale beelden te creëren, met succes. De onderzoekers van het Virtopsy® project tonen driedimensionale geometrische documentatie van verwondingen op het lichaamsoppervlak en interne structuren. De benodigde technologie hiervoor omvat fotogrammetrie, surface imaging, CT en MRI. De bekomen informatie wordt gebruikt om reconstructies te maken die een antwoord geven op het dynamische ontstaan van verwondingen. Verder hoopt men de kenmerken van de verwondingen te kunnen linken aan de schade aan het voorwerp dat waarschijnlijk de oorzaak was. Deze techniek wordt toegepast op auto-ongelukken. Men tracht verwondingen te linken aan schade aan voertuigen. In de toekomst is er voor deze toepassing mogelijkheid om de opgedane kennis door te geven aan het onderzoek in verband met auto-ongelukken, waarbij men de veiligheid kan proberen verhogen en het concept van crash dummies optimaliseren. (22)

Buck et al. maakten 3D reconstructies van verkeersongelukken met voetgangers of fietsers. Hun doel was een verband vinden en documenteren tussen de verwondingen, de schade aan het voertuig dat betrokken was en het ontstaan en verloop van het ongeluk. Dit is tevens van groot medicolegaal belang. Zij maakten CT en MRI beelden van de inwendige en uitwendige verwondingen. Van de betrokken voertuigen, voorwerpen en het lichaamsoppervlak maakten zij 3D oppervlaktebeelden. De kleding werd hierbij mede gescand. Deze beeldvorming vormden zij aan de hand van Sliceviewer software om tot 3D modellen, waarbij de rijrichting, het verband tussen de letsels en de schade aan het voertuig en de wijze van impact geometrisch bepaalden. Het driedimensionale model van het slachtoffer werd aan de hand van Discreet 3ds max software in de juiste (anatomisch correcte) positie gebracht tijdens de reconstructie. (23)

Bij deze reconstructies trachtten zij de uitwendige letsel op te delen in verschillende categorieën, zijnde verwondingen opgelopen als gevolg van impact, roll-over, run-over en val. Bij de eerste casus vonden zij een typische fractuur als gevolg van impact: de wedge fractuur (Messerer fractuur). Een ander typisch letsel veroorzaakt door de impact is oedeem of hemorragie van het beenmerg. Dit is te herkennen aan een hyperintens letsel op een T2 gewogen fat saturated MRI beeld of een hypo-intensiteit op een T1 gewogen beeld. Bij de reconstructie en het ineenpassen van letsel bij het slachtoffer ten opzichte van schade aan het voertuig en de fiets van het slachtoffer, bleek de fiets niet op de grond te staan. Wanneer de auto vooraan lager kwam te staan, raakte de fiets wel de grond. Dit toonde aan dat de auto geremd had bij de aanrijding. Voor het aanrijden van een persoon, gevolgd door overrijden en omrollen vonden zij aanwijzingen bij de tweede casus: een wedge fractuur van de femur, een traumatische amputatie van het rechter been en een

abrasie van de rechter schoenzool. De lijnen die de verwondingen toonden op het been van deze overledene waren niet evenwijdig. Dit is een aanwijzing voor het feit dat de persoon zijn been gebogen hield op het moment van het ongeluk, aangezien deze lijnen evenwijdig dienen te zijn. Door reconstructie met een testpersoon kon aangetoond worden dat het slachtoffer geknield op de rijbaan zat. Verder toonde ook de schade aan de jas aan dat de persoon omgerold was. De reconstructiebeelden van deze twee cases vindt u in bijlage 8. (23)

De voordelen van deze toepassing zijn multiple van aard. Er is mogelijkheid tot 3D informatie zonder aanraking van het lichaam. De CT en MRI beelden kunnen dienen als basis voor verdere reconstructies en kunnen voor onbepaalde tijd bijgehouden worden. De beeldvorming is zeer informatief voor het gerecht. Leken, zoals bijvoorbeeld advocaten en juryleden, kunnen de beelden makkelijker interpreteren en beoordelen. Dit is zeker het geval indien ze tot een video omgevormd worden. Het gerecht dient de betrokken voertuigen niet meer te stockeren om indien nodig opnieuw te onderzoeken, zodat deze kost uitgespaard wordt. Van emotioneel belang is het feit dat het niet meer nodig is om autopsiefoto's te tonen. Deze beelden zijn meestal gruwelijker, omdat zij vaak veel bloed en defigurerende letsels tonen, in tegenstelling tot de 3D beelden die er minder menselijk uitzien. Dit is van belang om bijvoorbeeld nabestaanden minder te shockeren. Een groot nadeel is dat er hoogopgeleide mensen nodig zijn om met deze software te werken en data te interpreteren, ook al zijn de gebruikte beeldvormingstechnieken vrij eenvoudig en grotendeels geautomatiseerd. (23)

In een latere studie gaan Buck et al. dieper in op de occulte botlaesies als teken van rechtstreekse impact bij verkeersongelukken. Zij onderzochten deze laesies met MRI. Een occulte botlaesie is een blauwe plek van het bot. Dit wil zeggen dat er een bloeding is in het subcorticaal beenmerg, als gevolg van microfracturen ter hoogte van de medullaire trabeculae. Op gemacereerd bot kan je dit herkennen aan een bruinige verkleuring, op MRI beeldvorming wordt dit opgezocht aan de hand van afwijkingen in de signaal intensiteit. In het geval van een bloeding of oedeem is in de impactregio ter hoogte van het beenmerg een hypo-intens T1 gewogen beeld te vinden en een hyperintens T2 gewogen fat saturation beeld. Zij besluiten dat deze techniek makkelijk en sneller is dan de klassieke methode, die maceratie van het bot en observatie van lichttransmissie inhoudt. De techniek is tevens niet invasief en kan ook op levende slachtoffers toegepast worden. Een nadeel is dat dergelijke botlaesies ook voorkomen bij lijken in staat van ontbinding, waarbij differentiatie tussen impact en decompositie als oorzaak niet mogelijk is. Zij besluiten nog eens dat voor de reconstructie van een botsing zowel de verwondingen als gevolg van de impact én de aanwijzingen op de kleren belangrijk zijn om te matchen met de schade aan het voertuig.

Hierbij wordt nogmaals het belang van de differentiatie tussen impactverwondingen en valletsels benadrukt. (24)

Dirnhofer et al. bespreken de wedge fractures als teken van impact, maar tevens ook de graad van contusie van het subcutane vetweefsel. Dit is een indicatie voor de kracht van de impact, soms ook voor de richting. Wanneer er hoogstwaarschijnlijk sprake is van een tangentiële impactrichting, vindt men een subcutane caviteit met daarin bloed en geliquefiëerd vet. Deze holte is op axiale beeldvorming makkelijk te herkennen door de sedimentatie van het bloed. Hierdoor ontstaan er lagen, waarbij het serum te herkennen is als de bovenste laag met een hoge signaal intensiteit. Een tangentiële impact is typisch bij personen die over gerold worden door een voertuig. De vaste elementen van een auto hebben een orthogonale impact. Dit in tegenstelling tot wielen die dus niet vast zitten, maar ronddraaien, en een tangentiële impact hebben. Tot slot stellen zij ook dat er een differentiatie te maken is tussen het feit of een hoofdwonde het gevolg is van vallen op de grond of raken van het hoofd bij de aanrijding. Dit gebeurt op basis van schedelfractuursystemen, de morfologische kenmerken van een crush-wonde en contre-coup laesies van de hersenen. Tot slot halen zij het belang aan van het met zekerheid kunnen zeggen wie de chauffeur was bij het auto-ongeluk. Het is mogelijk om de chauffeur van de passagiers onderscheiden aan de hand van verwondingen op hun lichaam. Zo kan men bijvoorbeeld de personen die vooraan zaten onderscheiden van diegenen achteraan zaten aan de hand van cutane verwondingen door de gordel en door typische dashboard verwondingen aan de onderbenen. (1)

2.8. Haptische technologie bij reconstructies

Haptische technologie maakt het mogelijk om digitale 3D data te voelen en te bewerken. Men kan als het ware de oppervlakte van een object voelen. Dit wordt verwezenlijkt door de gebruiker krachten en vibraties te laten waarnemen bij het “aanraken” van een voorwerp. De computer gebruikt hiervoor algoritmes, hardware en software. Zo doet men beroep op de hiervoor vernoemde 3D CT beelden, optical surface scanner GOM ATOS II/III, het fotogrammetrie systeem TRITOP, de Sliceviewer software en de Freeform Modelling Plus™ software. Voor het voelen schakelt men de Phantom Desktop™ Haptic Device in. (25)

Buck et al. pasten deze technologie toe op drie gevallen in verband met botpathologie. Het eerste omvatte een botfractuur van de lage extremiteiten bij een verkeersongeluk, het tweede een moord met een spade waarbij een vrouw de schedel werd ingeslagen, het derde een schotwonde door het hoofd. (25)

Wat de eerste case betreft, werd een botfractuur van het linkeronderbeen van een aangereiden fietser onderzocht. Elk los stuk bot werd virtueel teruggeplaatst met de FreeForm software, waarna de fractuurlijnen gekleurd werden met het Phantom haptic device. Het resultaat liet een wedge fractuur zien, waarbij aan de hand van de fractuurlijnen de richting van impact bepaald kon worden. In het tweede geval was het nodig om de spade te linken aan de moord, aangezien er door een te lang interval tussen moord en vondst geen DNA te vinden was op dit wapen. Om dit mogelijk te maken werd elk stukje van de schedel apart gescand met de 3D surface scanning en daarna virtueel bij mekaar gepuzzeld met het Phantom haptic device. Op het beeld werd een T-vormig letsel zichtbaar. De afmetingen van de spade werden berekend met de ATOS software, waarna een geometrische analyse aantoonde dat de spade perfect in de wonde paste. Voor het derde geval was het nodig om één van de twee wapens die gevonden werden op de plaats delict te linken aan de dodelijke schotwond en de schietrichting te bepalen. Men nam CT- en surface scans van het hoofd en de wapens. De botfragmenten werden virtueel teruggeplaatst en voor iedere positie van het verdachte wapen werd een opname gemaakt. Zo kon men de schietrichting reconstrueren aan de hand van de in- en uitgang van de kogel in de schedel. Tevens linkte men de beelden van het zachte weefsel aan de weg die de kogel had afgelegd in de hersenen. Hiervoor werd het 3D model in axiale en sagittale richting gesneden. (25)

Het voordeel van deze technologie is in hoofdzaak dat de botfragmenten op een niet-invasieve manier ingebouwd kunnen worden in een 3D model. Vervolgens is heel belangrijk dat de letsels gecorreleerd kunnen worden aan het oorzakelijk agens. Er zijn virtuele bewegingen mogelijk in alle richtingen en hoeken, zonder van modus te moeten veranderen, wat het geval is wanneer men gebruik maakt van een 2D besturing. De reconstructies lopen snel, makkelijk en precies. Een mogelijk toepassingsgebied is de reconstructie van gezichten ter identificatie. Een nadeel is dat vorm en grootte van de modellen niet aan te passen zijn, dit omwille van maatregelen in de software om modificatie van de beelden tegen te gaan. (25)

2.9. Toxopsy?

In 2010 verscheen in Legal Medicine een “Letter to the Editor” over de mogelijkheid van “toxopsy” als volgende stap in het proces van virtuele autopsie. De auteurs beschrijven het geval van een 21- jarige jongeman die overleed in het ziekenhuis na plotse ziekte. Na twintig minuten cardiaal arrest werden bij deze man hematochemische testen uitgevoerd. Om religieuze redenen was geen klassieke autopsie mogelijk. De man was gekend met sikkelcel anemie en er werden geen uitwendige verwondingen

gevonden bij inspectie. Op basis van deze gegevens en de laboresultaten kon besloten worden dat de man gestorven was na een acuut myocardischemie die het gevolg was van een trombo-occlusief event dat uitgelokt werd door een sikkelcelcrisis met ernstige anemie. Nadien werden toxicologische testen uitgevoerd op het lijk, die een verhoogde waarde van MDMA aantoonde (ecstasy). Deze waarde was hoog genoeg om de hartslag en de arteriële druk te verhogen en een groter trombotisch risico te genereren. In gedachten houdende dat het slachtoffer door zijn sikkelcel anemie een verhoogd risico vertoonde voor trombotische processen, kan men besluiten dat de dosis MDMA de trigger was voor het trombo-occlusief event dat leidde tot zijn dood. (26)

Vetrungo et al. besluiten dat de laboratoriumresultaten op zichzelf in staat waren om de doodsoorzaak te bepalen. Het zal mogelijk zijn om in selecte gevallen op basis van biochemie en toxicologie een doodsoorzaak te bepalen, maar de indicaties zullen zeer gering zijn. Zij stellen dat post mortem biochemie en toxicologie de moeite waard zijn om toe te voegen aan het arsenaal van alternatieve procedures wanneer een volledige klassieke autopsie niet mogelijk is. Tevens benadrukken zij dat technieken echter supplementair zijn, en waarschijnlijk zullen blijven, aan de klassieke autopsie. (26)

2.10. Data management en teleconsultatie

Dankzij het Virtopsy® project is er reeds een grote hoeveelheid radiologische forensische data beschikbaar. Deze kunnen makkelijk gearchiveerd worden, gedeeld via een netwerk, gekopieëerd, geanalyseerd en gepostprocessed na het maken van de beelden. Deze manier van werken drukt de kosten voor het archiveren, de film, de verwerking van de film en de archiefruimte. (27)

Aghayev et al. stellen voor om het gebruik van een centrale database voor forensische geneeskunde in te voeren. Deze kan dan gebruikt worden om een vergelijking te maken tussen radiologische data onderling en van radiologische data ten opzichte van autopsiegegevens. Men kan dus op zoek gaan naar typische kenmerken bij bepaalde pathologiën en tevens de accuraatheid van de bevindingen correleren met de klassieke autopsie. Verscheidene onderzoeksgroepen over de hele wereld kunnen dan op deze manier informatie en gegevens uitwisselen in het kader van een wereldwijd project rond virtuele autopsie. Het is namelijk zo goed als onmogelijk om dit gehele idee uit te werken in één enkel instituut. Om virtuele autopsie te kunnen valideren en tot routinegebruik om te vormen zijn immers grote aantallen onderzochte lichamen nodig. Gegevensuitwisseling via het internet is hier de goedkoopste oplossing. (28)

Bijkomende voordelen van deze database zijn multipel van aard. Belangrijk is dat het systeem digitale en gestandaardiseerde documentatie bevat die op ieder moment geconsulteerd kan worden door geregistreerde gebruikers. De database is tevens een bron voor epidemiologische informatie omtrent forensische radiologie en pathologie. De gegevens kunnen ook gebruikt worden om specialisten in forensische geneeskunde en forensische radiologie op te leiden. Tot slot is het ook mogelijk om via deze weg aan kwaliteitscontrole te doen. (28)

De database die gebruikt wordt voor het Virtopsy® project aan de Universiteit in Bern is een centrale Oracle 8i database. Dit slaat een protocol op met vraag en antwoord, waarbij gevalideerd wordt, en verzamelde sets van data. Een diagram dat toont hoe het protocol opgesteld is, vindt u in bijlage 9. Het prospectief invullen van dit protocol duurt ongeveer twintig minuten, retrospectief is dit tien minuten meer omwille van opzoekwerk. De beveiliging van privégegevens gebeurt via een lokale web server die werkt als een filter. Alle informatie die gebruikt kan worden ter identificatie van een lichaam wordt gecodeerd. Deze gegevens worden opgeslagen op een lokale server en niet doorgegeven naar de centrale database. Enkel anonieme gegevens bereiken de centrale unit. Aangezien er geen dure hardware en software nodig is om gebruik te maken van deze database en omdat het onderhoud en de upgrades van het systeem enkel gebeuren in de centrale unit, kost het werken met dit instrument een deelnemend instituut slechts 50 dollar per maand. De kost is tevens onafhankelijk van het aantal ingebrachte gevallen per instituut. Voorlopig is het enkel mogelijk om het systeem te raadplegen en gebruiken in vijf talen. (28)

2.11. Virtuele autopsie in het UZ Gent

In het UZ Gent wordt er heden ten dage in het kader van virtuele autopsie onderzoek gedaan naar de radiologische bevindingen bij drenkelingen post mortem. Dit is een samenwerking tussen de dienst radiologie onder leiding van Prof. Dr. K. Verstraete en de dienst gerechtelijke geneeskunde onder leiding van Prof. Dr. M. Piette. In het kader van dit onderzoeksopzet wordt er op de dienst radiologie een whole body CT scan genomen van de drenkeling. Hierna wordt het lichaam getransporteerd naar de dienst gerechtelijke geneeskunde waar het een klassieke autopsie ondergaat. Men gaat op zoek naar typische bevindingen op CT scan die de diagnose van verdrinking zouden kunnen hard maken en of het mogelijk is om de klassieke autopsie te vervangen door virtuele autopsie in deze gevallen. De diagnose van verdrinking blijft namelijk tot op de dag van vandaag een zeer moeilijke diagnose, zonder karakteristieken die voor de volle honderd procent zeker kunnen aantonen dat men het bij het juist eind heeft. Ook

identificatie van het lichaam is aan de orde. Momenteel, zijnde eind april 2011, zijn reeds ± 20 lichamen op deze manier onderzocht.

De keuze voor dit onderwerp is zeker terecht. Volgens cijfers van de Cel Vermiste Personen zijn er sinds het opstarten van de Cel op 4 september 1995 tot en met 30 juni 2010 16510 onrustwekkende verdwijningen geweest. Hiervan zijn slechts 777 dossiers nog niet opgelost, tegenover 15733 dossiers die wél opgelost zijn. 95,3 procent van de dossiers kan dus afgesloten worden. Van het totale aantal verdwijningen worden 1843 personen niet levend teruggevonden. Bij het merendeel van deze personen, 1193 om precies te zijn, gaat het om zelfdoding. Hiervan kozen 735 mensen voor de verdrinkingsdood. (29) Het water is dus een belangrijke factor voor de Cel. Waterlijken vormen de grootste categorie van lichamen die zij terugvinden. Dit soort lichamen zorgt tevens voor de grootste problemen qua identificatie en autopsie door de snelle decompositie van lichamen in het water en het afrukken van lichaamsdelen door scheepsschroeven. Ieder onderzoeksopzet dat hoopt de identificatie en autopsie te kunnen vergemakkelijken is een stap in de goede richting.

In het kader van dit onderzoek deed ik een literatuurstudie naar de pathologische en radiologische bevindingen bij verdrinking. De radiologische bevindingen zijn hieronder beschreven. Voor de pathologische bevindingen verwijs ik u graag naar bijlage 10. Op het einde van deze bijlage vindt u ook de gebruikte bronnen terug.

2.11.1. Radiologische bevindingen bij oedeem en aspiratie

Hydrostatisch pulmonair oedeem

Hydrostatisch pulmonair oedeem ontstaat door een abnormale verhoging van extravasculair vocht als gevolg van een verhoogde druk in de pulmonaire circulatie. Dit is bijvoorbeeld het geval bij congestief hartfalen en bij een te groot intravasculair volume. (30)

Met CT worden bij hydrostatisch oedeem “ground-glass” opaciteiten gevonden. Dit zijn gebieden van de long met een verhoogde attenuatie, waarbij de onderliggende vaten niet donkerder afgebeeld worden. Zij kwamen diffuus of gevlekt en geografisch voor. Vaak zijn deze opaciteiten volgens de zwaartekracht verdeeld over de longen. Bij oedeem door verhoogd intravasculair volume is er echter vaak sprake van een voorkeursdistributie naar perifeer en subpleuraal. (30)

Bij het oedeem is sprake van verdikking van de interlobulaire septa door accumulatie van oedeemvloeistof in het interstitium. Dit is op CT terug te vinden als lineaire en reticulare opaciteiten van één tot vijf millimeter dik. Het beeld is vaak uniform. Verdikking van de interlobulaire septa werd altijd gezien in combinatie met peribronchovasculaire interstitiële verdikking. Dit is op CT te zien als een verdikking van de bronchiale wand. Het kan de centrale pulmonaire of kleinere intrapulmonaire bloedvaten groter doen lijken dan normaal. (30)

Bij congestief hartfalen kunnen de pulmonaire arteriën en venen gedilateerd zijn. Men ziet dit het makkelijkst in de parahilaire gebieden van de long, waar de arteriële en bronchiale takken tegenover mekaar bekeken kunnen worden. Centrilobulaire arteriële takken kunnen schijnbaar ook verwijd zijn, al kan dit slechts zo lijken door het omliggende oedeem. In relatie tot interlobulaire septa kan men soms verbrede longvenen aantreffen. (30)

Transsudatieve pleurale effusies kunnen meestal aangetoond worden. Onder andere als gevolg van deze effusies, kan verdikking van de interlobaire fissuren gezien worden door subpleurale accumulatie van interstitieel vocht. (30)

Aspiratie van zand

Een RX thorax van een 26-jarige vrouw, genomen één uur na een ongeval met bijna-verdrinking, toonde zand aan in de fundus van de maag en een zandbronchogram in de onderste rechter lob van de long. Een CT van de thorax toonde consolidatie aan van de onderste lob van de beide longen. Men vond ook hoog-geattenuëerd radiodens materiaal in de bronchi van de lage lob. Een CT van het hoofd toonde een lucht-vocht niveau en een vocht-zand niveau aan in de rechter sinus maxillaris. Bronchoscopie gaf een beeld van diffuse luchtweginflammatie, erytheem en een brokkelige mucosa. De follow-up CT van de thorax toonde geen overgebleven zand meer aan, maar wel kleine opaciteiten die toegeschreven werden aan atelectase en/of scarring. (31)

RX thorax bij twee patiënten met zand-aspiratie toonde bij de ene patiënt, een drenkeling, een dense tracheobronchiale opacificatie aan dat geïmpacteerd zand bleek te zijn. Bij de andere patiënt, slachtoffer van bijna-verdrinking, vond men een klein zandbronchogram. In vier gevallen van accidentele begraving met zand- en gravelaspiratie als gevolg vond men telkens een zandbrochogram met radiodens materiaal in de tracheobronchiale boom op de RX thorax. (31)

Bij RX thorax van drenkelingen, of slachtoffers van bijna-verdrinking, wordt vaak volgende abnormaliteit beschreven: nodulaire, confluërende perihilaire opaciteiten verenigbaar met pulmonair oedeem. De apex, basis en laterale longgebieden blijven meestal gespaard. Een luchtbronchogram kan, al dan niet prominent, aanwezig zijn. (31)

2.11.2. Radiologische bevindingen bij verdrinking

Bijna-verdrinking

In een studie met zes patiënten, welke tussen twee en vijf minuten onder water waren, bestudeerde men RX thorax en CT-scans. De RX thorax toonde bilaterale luchtopaciteiten bij alle patiënten, centraal bij vijf en diffuus bij één patiënt. De apicale zones van de longen waren gespaard bij vier van de zes patiënten, de basale delen bij alle patiënten. De CT-scans toonden bilaterale onregelmatige of diffuse zones met “ground-glass” attenuatie bij alle patiënten. Deze was centraal bij vier, en diffuus bij twee slachtoffers. Bij drie patiënten vertoonde de attenuatie een geografisch patroon. De scan toonde bij één patiënt consolidatie aan. Bij vier slachtoffers was er sprake van slecht gedefinieerde centrilobulaire nodules en/of opaciteiten in de vertakkingen. Fijne intralobulaire reticulair opaciteiten in de gebieden met ground-glass attenuatie (crazy-paving) werden gevonden bij drie patiënten. Dit is een niet-specifiek gegeven dat gezien kan worden bij verschillende interstiële longziekten. Interlobulaire verdikking van het septum werd teruggevonden bij één patiënt. In twee gevallen vond men peribronchiale of perivasculaire luchtdensiteit wat interstitieel pulmonair emfyseem en pneumomediastinum doet vermoeden. (32)

Initiële röntgenfoto's van de thorax kunnen diffuus, perihilaire of gelokaliseerd pulmonair oedeem tonen. Er kan echter ook helemaal niets te vinden zijn, ook al toont de kliniek duidelijk oedeem aan. Bilaterale symmetrische perihilaire opaciteiten zijn de meest voorkomende bevindingen. CT bleek in de studie van Kim et al niet meer informatie te bieden dan de RX thorax. (32)

Verdrinking (CT tov. autopsie)

In de studie van Christe et al werd enkel gebruik gemaakt van gegevens over drenkelingen die omkwamen in zoet water. De pathofysiologie is hierbij anders dan verdrinking in zout water. De resultaten kunnen dus onderling verschillen. De controlegroep bestaat uit slachtoffers van bijna-verdrinking. (33) Levy et al gebruikte als controlegroep personen die stierven aan atherosclerotische coronaire hartziekte. (34)

Paranasale sinussen en mastoid

Christe et al toonde aan dat bij alle drenkelingen water te vinden was in de maxillaire en sphenoidale sinussen, terwijl dit bij de controles veel minder het geval was. Er werd een waterige inhoud teruggevonden in de frontale sinussen bij zeventig procent en in de ethmoïdale bij tachtig procent. Dit werd eveneens veel minder aangetroffen bij de controles. (33) Ook Levy et al toonde aan dat bij alle drenkelingen water aanwezig was in de paranasale sinussen en bilateraal in de caviteiten van het mastoid. Vijfentwintig procent had ook sterk geattenuëerd materiaal op de bodem van de maxillaire en sphenoidale sinus. Dit werd bevestigd door autopsie en stemde overeen met geïnhaleerd sediment. In de controlegroep vond men vocht in het mastoid bij vijfentwintig procent. Tien van de twaalf controles hadden vocht in één of meerdere sinussen. Bij hen werd echter geen sediment gevonden in de sinussen of luchtwegen. (34)

Luchtwegen

De studie van Christe et al toonde aan dat bij elk geval zowel op CT als bij autopsie vocht te vinden was in de luchtwegen. Dit werd voornamelijk gedetecteerd ter hoogte van de hoofdbronchi, die voor twee derden gevuld waren. In de kleinere bronchi was ongeveer de helft van het lumaal volume geoblitereerd. In tachtig procent van de gevallen werd met CT ook vocht aangetoond in de pharynx, terwijl er bij autopsie slechts vijftig procent ontdekt werd. Bij zestig procent werd geaspireerd vocht in de longen gedetecteerd, tegenover tien procent bij autopsie en dertig bij histologisch onderzoek. (33) Levy et al vond in zesentwintig gevallen vocht in de trachea en hoofdbronchi. Voor de controlegevallen was dit ongeveer evenveel. Bij de twee overblijvende drenkelingen vond men bilateraal vocht in de secundaire bronchi. Vijftig procent had hoog-geattenuëerd sediment in de distale trachea en hoofdbronchi. Dit sediment werd ook aangetoond met autopsie. Zij besluiten dat dit sediment zeer suggestief is voor verdrinking. (34)

Het emphysema aquosum werd door Christe et al aangetoond aan de hand van de diafragmastand, de bronchio-arteriële coëfficiënt en het mozaïekpatroon van de hypo- en hypergeperfundeerde gebieden van de longen. De stand van het diafragma was lager bij verdrinking, zowel bij CT als autopsie. De bronchio-arteriële coëfficiënt is de diameter van de bronchus gedeeld door de diameter van de pulmonaire arterie. Het is een teken van bronchospasme en/of waterresorpsie. Bij verdrinking is deze coëfficiënt lager. Dit werd histologisch bevestigd. Het mozaïekpatroon was aanwezig in zestig procent van de gevallen, tegenover tien procent bij de controle. Het werd beter gevisualiseerd met CT dan bij autopsie. (33)

Pulmonair oedeem kon met CT aangetoond worden in vijftig procent van de gevallen. Pleurale effusie bij zeventig procent, maar wel bij tachtig procent met autopsie. De controles vertoonden slechts bij zestien procent pleurale effusie. Een schuimprop werd zowel bij CT als autopsie in twintig procent van de

gevallen aangetoond. (33) Levy et al toonden bij eenentwintig procent van de drenkelingen een schuimig vocht aan in de luchtwegen, tegenover elf procent van de controles. Zij besluiten dat dit schuimig vocht zeer suggestief is voor verdrinking. Pleurale effusie kwam voor bij achtenzestig procent van de slachtoffers. Bijna negentig procent van de drenkelingen vertoonden pulmonaire ground-glass opaciteiten met septale tekening. Soms werden de secundaire pulmonaire lobes gespaard. Deze ground-glass opaciteiten kwamen voor bij alle controles. Een lichte pneumothorax werd bilateraal aangetroffen in drie gevallen zonder uitgesproken ontbinding. Bij drie gevallen met uitgesproken ontbinding werd bilateraal een gemiddelde pneumothorax aangetroffen. Er is dus een overlap tussen drenkelingen en controlegroep wat betreft vocht in de sinussen, trachea en bronchi. Dit is ook het geval voor de ground-glass opaciteiten, waarschijnlijk is het cardiogeen oedeem hier de oorzaak van. (34) De opaciteiten zijn zeer gelijkend op deze gevonden door Kim et al in gevallen van bijna-verdrinking met als verschil dat Kim et al vooral centrale distributie vinden, tegenover apicale en perihilaire distributie bij Levy et al. (32) (34)

De vlekken van Paltauf, een klassiek gegeven bij verdrinking, konden niet aangetoond worden met CT door Christe et al. Nochtans zijn zij aanwezig in zeventig procent van hun gevallen. Dit ligt aan het feit dat deze pleurale afzettingen van hemoglobine, gevormd na hemolyse, te klein zijn om zichtbaar te zijn met CT. MRI zou hier een oplossing kunnen bieden. (33)

Hart en bloedvaten

CT kon geen significant verschil aantonen in hartgrootte tussen drenkelingen en controles in de studie van Christe et al. Dertig procent vertoonde een vergroot hart op CT, veertig procent bij autopsie. Zeventig procent van de controles hadden een vergroot rechteratrium. De CT toonde wel bij een groter percentage van de gevallen het vergroot rechteratrium of ventrikel aan dan autopsie. Er werd een vergroot rechteratrium aangetroffen in zestig procent tegenover veertig, en een vergroot rechterventrikel in veertig tegenover twintig procent van de gevallen. (33)

De gemiddelde densiteit van het bloed in het rechter atrium was 50 HU, tegenover 64 HU bij de controles. Dit is een significant verschil in densiteit. Een bloeddensiteit lager dan 55HU zou indicatief zijn voor hemodilutie. Het linker atrium toonde een klein verschil van 5 HU. (33)

Maag en duodenum

Bij Christe et al had de maag gemiddeld een inhoud van 470 ml. Dit werd bevestigd met autopsie waarbij men een gemiddelde inhoud van 480 ml terugvond. Bij de controlegroep werd slechts de helft van dit volume teruggevonden. De inhoud was bij de drenkelingen meer gedilueerd met een gemiddelde van

20 HU, tegenover 39 HU bij de controles. Het duodenum was verbreed door een waterige inhoud in negentig procent van de gevallen, tegenover zestig procent van de controlegevallen. Zowel maag als duodenum zijn dus verbreed, maar alleen bij het duodenum is er sprake van een significant verschil ten opzichte van de controlegevallen. (33) Levy et al toonde een maagdistentie aan in bijna negentig procent van de gevallen, waarvan er bij zes personen sediment kon aangetoond worden. Dit werd bevestigd door autopsie. In de controlegroep had iedereen een gecollabeerde maag en kon men geen sediment aantonen. (34)

	CT-scan	AUTOPSIE	CONTROLE
Water in maxillaire en sfenoidale sinussen	100%		<100%
Water in frontale sinussen	70%	<70%	minder
Water in ethmoidale sinussen	80%	<80%	minder
Hoog-geattenuerd materiaal bodem maxillaire en sfenoidale sinussen	25%	25%	
Vocht in farynx	80%	50%	
Geaspireerd vocht in de longen	60%	10%	
Vocht in trachea en hoofdbronchi			
Mozaiekpatroon	60%		10%
Pulmonair oedeem	50%		
Pleurale effusie	70%	80%	16%
Schuimprop	20%-21%	20%	11%
Ground-glass opaciteiten	90%		100%
Vlekken van Paltau	0%		70%
Vergroot hart	30%	40%	
Vergroot rechteratrium	60%	40%	
Vergroot rechterventrikel	40%	20%	
Densiteit bloed rechter atrium	50 HU		64 HU
Maaginhoud	470 ml	480 ml	240 ml
Dilutie maaginhoud	20 HU		39 HU
Verbreed duodenum	90%		60%
Maagdistentie	+/- 90%	+/- 90%	Gecollabeerde maag

2.11.3. Bijna-verdrinking tov. verdrinking

In het geval van bijna-verdrinking is het vinden van een ground-glass patroon dominant bij CT. Er is hier geen sprake van emphysema aquosum. Bij verdrinking vindt men vooral primaire luchtconsolidatie als gevolg van pulmonair oedeem en/of aspiratie. (33)

2.11.4. (Cerebrale) Arteriële gasembolie bij duikongevallen

Arteriële gasembolie (AGE) komt voor na barotrauma en is vaak de doodsoorzaak in deze gevallen. Lucht kan enerzijds ontsnappen in de lichaamsconcaviteiten, wat pneumothorax en pneumomediastinum tot gevolg heeft. Anderzijds kan het ook in de pulmonaire venen terechtkomen, wat arteriële gasembolie geeft. De luchtbelletjes komen vervolgens terecht in caudale gebieden, zoals het hart, in posities waarbij het hoofd naar beneden hangt. Dit heeft myocardinfarct als klinische manifestatie. Wanneer het hoofd naar boven gericht is komen de gasbelletjes terecht in de cerebrale bloedvaten, wat leidt tot een beroerte. (35)

Oliver et al bestudeerden vier gevallen. Bij de eerste duiker toonde de CT-scan gas in de bloedvaten van het hart, de hersenen en andere vaten. Er werd ook gas aangetoond in de pleurale caviteiten. Autopsie toonde gas aan in het linker ventrikel, de aortaboog en de hersenen. Additioneel werden tekens van pulmonair oedeem, myocardinfarct, coronaire atherosclerose en een vervette lever gevonden. De CT van de tweede drenkeling gaf een systemische luchtembolie aan, alsook cerebrale gasembolie. Bij de autopsie vond men hyperinflatie van de longen met tekenen van pulmonair barotrauma en verdrinking. Het linker trommelvlies was gescheurd en er werd bloed gevonden in beide binnenoren. Het derde slachtoffer had een CT waarop men lucht in de coronairen, lever en milt kon zien. Er was verlies in differentiatie tussen de witte en grijze massa in de hersenen, wat kan wijzen op hypoxische ischemie. De autopsie toonde lucht aan in de posterieure coronairen, de LAD en de femorale arteriën. De longen vertoonden hyperinflatie en tekens van pulmonair oedeem. Bij de laatste duiker waren er op CT kleine luchtbelletjes te zien in de lever en de rechterzijde van het hart. Er werden tekenen van verdrinking gevonden in de longen en hersenen. Dit werd bevestigd bij autopsie. Lucht werd gevonden in het rechterventrikel. De luchtbelletjes waren waarschijnlijk het gevolg van post mortem veranderingen. Bij drie van de vier gevallen kon CT dus reeds voor autopsie de diagnose van AGE stellen, in het vierde geval kon CT helpen bij de diagnose van verdrinking. Men moet in het achterhoofd houden dat intravasculair gas ook aanwezig kan zijn om andere redenen zoals bijvoorbeeld gasproductie bij putrefactie en post mortem decompressie (off-gassing). (35)

Naar aanleiding van het mogelijke off-gassing artefact hebben Cole et al de relevantie van post mortem CT-scan voor de diagnose van cerebrale arteriële gasembolie onderzocht. Zij gebruikten hiervoor zeven Merino schapen, waarbij zij een barotrauma nabootsten. Zij vonden met CT dat geen enkel schaap binnen het uur significante gascollecties vertoonde in weefsel of bloedvaten. Binnen 24 uur echter ontwikkelden alle schapen significante hoeveelheden gas in hun vasculair systeem. Dit werd bevestigd door autopsie. Geen enkel controledier vertoonde gasontwikkeling binnen de 24 uur, na deze periode werden echter wel kleine hoeveelheden gas gevonden in de kadavers. Zij besluiten dat CT niet aan te raden is als methode om te bepalen of cerebrale arteriële gasembolie is opgetreden. Intravasculair gas komt waarschijnlijk sowieso na bepaalde tijd post mortem voor als gevolg van off-gassing. Enkel CT-bewijzen van pneumothorax, pneumomediastinum of pulmonair emfyseem kunnen volgens Cole et al gebruikt worden om pulmonair barotrauma aan te tonen. Zij sluiten echter niet uit dat een CT die uitgevoerd wordt binnen één à twee uur na het fatale ongeluk nuttig kan zijn als het cerebraal intravasculair gas aantoont, omdat in het onderzoek binnen die tijdsspanne geen gas aantoonbaar was. (36)

2.11.5. Bevindingen Virtopsy® Project

De voorlopige conclusies van het Virtopsy® project omtrent verdrinking zijn hieronder opgesomd. Zij stellen dat er eerder typische dan specifieke bevindingen te noteren zijn. (16)

Volgens Christe et al. is er meestal een schuimprop of vocht te vinden in de luchtwegen (tot het niveau van de hoofdbronchi). Het bronchospasme bewerkstelligt een lage diafragmastand en emphysema aquosum. Bij zoet water verdrinking vindt men in zestig procent van de gevallen een mozaïekpatroon in het longparenchym. Dit is het gevolg van hyper- en hypoperfusie en aspiratie. De resorptie van zoet water zorgt voor hypodens bloed door hemodilutie. Dit kan op zijn beurt leiden naar hartfalen. Zout water geeft aanleiding tot pulmonair oedeem. De paranasale sinussen zijn door influx altijd gevuld met water. Ook kan een uitgezette maag en duodenum gevonden worden door de hoeveelheden ingeslikt water. (16) Dirnhofer et al. halen aan dat emphysema aquosum en retrosternale “kissing” van de longen, samen met actief ingeslikt water in de gastro-intestinale tractus, indiceren dat er sprake is van een actief verdrinkingsproces waarbij het slachtoffer bij bewustzijn was. (1)

3. Hoe lang is het slachtoffer reeds overleden?

Het bepalen van het tijdstip van overlijden is een moeilijke zaak. De decompositie van een lichaam post mortem heeft een grote invloed op de concentraties van chemische componenten. Magnetische resonantie spectroscopie (MRS) zou in combinatie met MR beeldvorming een groot potentieel bieden om pre-terminale en post mortem metabolietconcentraties in weefsel te bepalen. Deze concentraties kunnen dan leiden naar het tijdstip van overlijden. (27) Een andere mogelijkheid is om de formatie van adipocere te onderzoeken. Jackowski et al. konden met CT scan en MRI de mate van adipocerevorming vastleggen. Deze informatie kan gebruikt worden om het post mortem interval aan te tonen, indien de post mortem condities gekend zijn. (17)

4. Medicolegale aspecten in de radiologie

Dirnhofer et al. stellen dat post mortem CT een mogelijkheid biedt om medicolegale disputen te documenteren. Zij raden aan om deze beeldvorming uit te voeren voor elke andere vorm van autopsie. Deze informatie kan vooral van nut zijn in gevallen waarbij personen overlijden tijdens of kort na (minimaal) invasieve behandelingen. (1)

Ruder et al. kunnen in 2011 met trots de eerste virtuele autopsie voorstellen, die zonder controle-autopsie werd aanvaard door de gerechtelijke instanties. Dit gebeurde in Zwitserland. In dit land stelt de wet net als in België dat de procureur, die gemachtigd is met een zaak, beslist of er al dan niet een autopsie gebeurt en op welke manier. In het geval van een 92 jarige vrouw die omkwam na een aanrijding met een bestelwagen, werd beslist enkel een virtuele autopsie uit te voeren. Men ging over tot post mortem CT scan, MRI en biopsie. Hierna kon besloten worden dat de vrouw stierf als gevolg van een traumatische aortalaceratie. Het bewijs werd aanvaard door het gerecht. De auteurs hopen dat dit geval een precedent zal zijn voor de toekomst. Dit is een belangrijke stap voor het hele Virtopsy® project. (37)

5. Andere mogelijkheden binnen de forensische radiologie

5.1. Paleo-radiologie

Menselijke of dierlijke restanten uit vroegere beschavingen worden onderzocht in de paleo-radiologie. Hierbij wordt voornamelijk gezocht naar het geslacht, de leeftijd en mogelijke verwondingen of ziektes waaraan de overledene leed of de doodsoorzaak kunnen betekenen. Het grote voordeel aan deze tak van de forensische radiologie is dat de specimens niet aangetast dienen te worden zoals dit het geval is bij de klassieke autopsie en dus volledig intact bewaard kunnen worden. (1) Voor meer informatie omtrent deze interessante tak van de radiologie verwijs ik u graag naar bijlage 11. Dit artikel handelt over de medische beeldvorming bij mummies en historische lijken en bevat tevens mooie beelden. (38)

5.2. Radiologie bij niet-gewelddadige misdrijven

De forensische radiologie biedt een mogelijkheid in het bewijzen en documenteren van niet gewelddadige misdrijven. Daaronder verstaan we bijvoorbeeld drugsmokkel. De radiologie is dan in staat ingeslikte zakjes met drugs aan te tonen in het lichaam. Op de dienst radiologie van het UZ Gent loopt momenteel een onderzoek omtrent drugsmokkel. Ook diefstal kan aangetoond worden, wanneer de dief bijvoorbeeld diamanten inslikt bij de roof om ze te verbergen en makkelijk mee te nemen zonder ontmaskerd te worden. In het geval van autodiefstal is de politie in staat met radiografie een verborgen chassisnummer (VIN, vehicle identification number) in beeld te brengen. Een heel aparte tak van misdrijven is deze van vervalsingen van kunstwerken en antiek. Ook hier kan forensische radiologie een uitweg bieden door bijvoorbeeld “in” voorwerpen te kijken om het materiaal te onderzoeken of vergrotingen van schilderijen te maken die bepaalde afwijkingen tonen. (2)

5.3. Kindermishandeling, mishandeling van ouderen en partner

Bij mishandeling is radiologie een belangrijke pijler. De forensische radiologie kan hierbij belangrijke interne traumata en breuken aantonen. Deze documenten kunnen als bewijsmateriaal gebruikt worden in de rechtzaal. Er zijn verschillende vormen van mishandeling. Zo is er de kindermishandeling, hoofdtraumata spelen hierin een belangrijke rol. CT en MRI zijn zeer behulpzaam bij het ontdekken van

een shaken baby syndroom. Ook ouders of partners kunnen mishandeld worden, dit valt dan onder het intrafamiliaal geweld. (2)

Discussie

De identificatie van lichamen is één van de belangrijkste opgaven van de forensische radiologie omwille van het menselijk leed dat er achter schuilt. Het is nodig om dit proces zo snel en zo accuraat mogelijk te laten verlopen. Op het vlak van identificatie staat de wetenschap in het algemeen en de forensische radiologie al vrij ver. Er zijn meerdere technieken die bijdragen tot het oplossen van een zaak.

Wat betreft het bepalen van het geslacht, leeftijd, ras en postuur is het beenderig skelet één van de belangrijkste informatiedragers. De conventionele radiografie kan reeds veel morfologische en morfometrische osteologische parameters bepalen. Deze parameters zijn echter al tientallen jaren oud en niet echt meer toepasbaar op de bevolking van vandaag.. Er is dus dringend nood aan vernieuwing van deze gegevens. Er is tevens een mogelijkheid om de beeldvorming accurater te maken door de nieuwere technieken in te schakelen. Zo is de CT scan uitermate geschikt op het skelet te visualiseren. Door het wijdverspreid raken van dit toestel zal het CT beeld zeker meer en meer ingang vinden in de forensische wereld. Er wordt bijvoorbeeld onderzoek gevoerd naar bepaling van leeftijd aan de hand van de craniale suturen. Ook MRI biedt een nieuwe optie, wat bijvoorbeeld onderzocht wordt door het universitair ziekenhuis en de universiteit van Gent.

De radiologische identificatie is gebaseerd op het principe van gelijkenissen zoeken tussen ante en post mortem beeldvorming. Dit dogma blijft uiteraard hetzelfde ongeacht de gebruikte techniek. Tot nu toe werd vooral de radiografie aangewend. Deze hinkt echter steeds meer en meer achterop aangezien actueel de meeste slachtoffers ook een CT of MRI gekregen hebben in hun leven. Tweedimensionale beelden kunnen hiermee niet vergeleken worden. Post mortem driedimensionale beeldvorming biedt het voordeel dat de data omgevormd kan worden naar tweedimensionale beelden. Post mortem CT of MRI zijn dus vergelijkbaar met ante mortem RX, CT of MRI en superieur ten opzichte van RX. Ik ben er van overtuigd dat in een steeds evoluerende geneeskunde ook de forensische geneeskunde gelijke voet moet houden met de gebruikte technieken. Het belangrijkste lichaamsdeel ter vergelijking blijkt het hoofd te zijn. Het gebit biedt een schat aan informatie en wordt tegenwoordig niet meer alleen met röntgenfoto's, maar ook met CT scan onderzocht.

Wat betreft forensische radiologie bij rampsituaties is de CT ook hier het onderwerp van nieuw onderzoek. De frontale en sfenoidale sinus zijn een betrouwbaar middel om via vergelijking lichamen te identificeren. Conventionele radiografie kan echter enkel de frontale sinus aantonen, in twee dimensies, en de sfenoidale zo goed als niet. CT scan biedt hier een uitweg en is onderwerp van onderzoek.

Zoals de Cel Vermiste Personen aangeeft is het aantal lichamen dat niet geïdentificeerd raakt de minderheid van de zaken die zij behandelen. Persoonlijk denk ik dat de forensische radiologie een meerwaarde biedt in het proces van identificatie, maar dat er goedkopere alternatieven zijn wanneer men verder gaat qua technologie dan een röntgenfoto. Naar mijn mening is het interessant om de duurdere radiologische technieken te gebruiken voor de hardnekkige gevallen, de cold cases, die niet opgelost raken. Ik geloof zeker en vast in de doeltreffendheid van forensische radiologie ter identificatie, maar geef in de praktijk de voorkeur aan goedkopere middelen bij makkelijke zaken. Ik zou er echter wel voor willen pleiten om bij cold cases een uitgebreid forensisch-radiologisch onderzoek te doen met alle modaliteiten die de wetenschap te bieden heeft. Op het verdriet van de familie die in onwetendheid leeft staat in mijn ogen geen prijs.

Het Virtopsy® project van de universiteit van Bern is een zeer interessante en veelbelovende nieuwe wending in de wereld van de autopsie. De Virtobot® wordt steeds meer uitgebreid met apparatuur ,die een antwoord moet bieden op de nieuwe vragen die rijzen om tegemoet te komen aan het idee van een echte virtuele autopsie. De onderzoeksmethodiek biedt nu reeds voordelen ten opzichte van de conventionele autopsie. Zo biedt zij bijvoorbeeld een antwoord bij moeilijke diagnoses zoals pneumothorax en luchtembolie. Een belangrijk nadeel is de hoge kostprijs en de tijdsduur. Een klassieke autopsie wordt sneller uitgevoerd dan een uitgebreid MR onderzoek. CT scan is dan weer sneller.

Het idee van een werkelijke virtuele autopsie is echter niet aan de orde, zolang de radiologische apparatuur niet in staat is om op microscopisch niveau beelden te voorzien. Het opzet van een minimaal invasieve autopsie is mijns inziens wel mogelijk. De CT geleide biopsie biedt, mits verbetering van de sampling, een mooi alternatief voor de histologie van organen die uitgevoerd wordt bij conventionele autopsie.

Men probeert algemene conclusies en richtlijnen te kunnen trekken uit de lichamen die zij reeds onderzocht hebben. Momenteel is er reeds sprake van enkele algemene bevindingen, maar nog niet van echte richtlijnen. De virtuele autopsie is momenteel dus een handig hulpmiddel, maar kan de klassieke autopsie nog niet vervangen als gouden standaard. Het onderzoek is goed op weg, maar om

representatieve conclusies te kunnen trekken is het nodig zich te baseren op een veel grotere populatie. Hun idee van een wereldwijde database is een interessante stap in die richting. Ik denk echter dat dit moeilijk realiseerbaar is. Niet omwille van de kostprijs of de nodige middelen, maar omwille van het feit dat de onderzoeksgroepen die zich bezighouden met virtuele autopsie dun gezaaid zijn, als ik afga op de literatuur die ik gevonden heb. Het concept kan natuurlijk wel een boost zijn voor forensische instituten en faculteiten geneeskunde om zich hiervoor te engageren.

De virtuele autopsie is een interessante invalshoek om moeilijkere diagnoses zoals steek- en schotwonden en reconstructies van verkeersongelukken te documenteren. Een steekwonde vraagt een tijdrovende autopsie, het zoeken naar occulte botlaesies eveneens. Verder is er de moderne software die in staat is om prachtige driedimensionale reconstructies te maken, die zeker hun nut zullen bewijzen in de rechtszalen.

Het onderzoek rond virtuele autopsie in het UZ Gent, omtrent CT scans van drenkelingen, biedt belangrijke perspectieven. Zoals aangehaald door de Cel behoren waterlijken tot de meerderheid van de lichamen die zij vinden. Drenkelingen zijn door hun vaak verre staat van ontbinding moeilijke te autopsiëren en ook de diagnose van verdrinking op zich is moeilijk te stellen. Ik denk dat dit onderzoek zeker meerwaarde kan bieden, eventuele conclusies zouden de gerechtelijke geneeskunde en de forensische radiologie een grote stap vooruit helpen. Ik hoop dan ook van ganser harte dat dit onderzoek belangrijke informatie zal opleveren.

Het radiologisch onderzoek naar post mortem interval staat nog in de kinderschoenen. Veel literatuur is hier niet over bekend. Om een volledige autopsie te kunnen uitvoeren is dit echter aan de orde. In de toekomst is dus zeker en vast onderzoek omtrent dit onderwerp nodig.

Tot slot wens ik nogmaals aan te halen dat in Zwitserland de eerste virtuele autopsie aanvaard is als bewijsmateriaal in een rechtszaak. Dit is een belangrijke stap in de evolutie van virtuele autopsie en zal hopelijk een precedent zijn voor de toekomst, ook in andere landen. Jammer genoeg is in België, zoals aangehaald door het DVI, het gebruik van post mortem CT en MRI nog niet echt van de grond gekomen. Ik zou de gerechtelijke en forensische wereld dan ook graag warm maken voor de perspectieven die deze techniek biedt. Ik ben mij terdege bewust van het prijskaartje dat hieraan vasthangt, maar toch zou ik voorstellen om bij moeilijkere gevallen gebruik te maken van de mogelijkheden die virtuele autopsie biedt.

Conclusie

Als algemeen besluit zou ik willen stellen dat de forensische radiologie interessante perspectieven biedt op vlak van identificatie en autopsie. Omwille van de hoge kostprijs, zie ik de methodes niet onmiddellijk systematische ingang vinden. Ik ben er echter rotsvast van overtuigd dat de nieuwere methodes een uitweg bieden bij cold cases en moeilijke autopsiediagnoses en stel voor dat zij in deze gevallen routinematig geïmplementeerd worden.

Geciteerde werken

1. **Dirnhofer Richard, Jackowski Christian, Vock Peter, Potter Kimberlee, Thali Michael J.** VIRTOPSY: Minimally Invasive, Imaging-guided Virtual Autopsy. *RadioGraphics*. 2006, 26: 1305-1333.
2. **B.G., Brogdon.** *Forensic Radiology*. s.l. : CRC Press, 1998.
3. **Verhoff Marcel A., Ramsthaler Frank, Krähahn Jonathan, Deml Ulf, Gille Ralf J., Grabherr Silke, Thali Michael J., Kreutz Kerstin.** Digital forensic osteology --- Possibilities in cooperation with the Virtopsy project. *For Sci Int*. 2008, 174: 152-156.
4. **Harth Sebastian, Obert Martin, Ramsthaler Frank, Reuß Christina, Traupe Horst, Verhoff Marcel A.** Ossification Degrees of Cranial Sutures Determined with Flat-Panel Computed Tomography: Narrowing the Age Estimate with Extrema. *J Forensic Sci*. 2010, 55: 690-694.
5. **Hillewig Elke, De Tobel Jannick, Cuche Olivier, Vandemaele P., Piette M, Verstraete K.** Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new four-minute approach. *Eur Radiol*. 2011, 21: 757-767.
6. **Thali Michael J., Markwalder Thomas, Jackowski Christian, Sonnenschein Martin, Dirnhofer Richard.** Dental Ct Imaging as a Screening Tool for Dental Profiling: Advantages and Limitations. *J Forensic Sci*. 2006, 51: 113-119.
7. **Ruder Thomas D., Kraehenbuehl Markus, Gotsmy Walther F., Mathier Sandra, Ebert Lars C., Thali Michael J., Hatch Gary M.** Radiological identification of disaster victims: A simple and reliable method using CT of paranasal sinuses. *Eur J Radiol*. 2011, Epub Ahead of Print.
8. **Remue, Alain.** Informatiebrochure Cel Vermiste Personen.
9. *The Virtopsy® Project*. [Online] [Cited: april 15, 2011.] www.virtopsy.com.
10. **Ebert Lars Christian, Ptacek Wolfgang, Naether Silvio, Fürst Martin, Ross Steffen, Buck Ursula, Weber Stefan, Thali Michael.** Virtobot - a multifunctional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg*. 2010, 6: 18-27.
11. **Grabherr Silke, Gygax Erich, Sollberger Barbara, Ross Steffen, Oesterhelweg Lars, Bolliger Stephan, Christe Andreas, Djonov Valentin, Thali Michael J., Dirnhofer Richard.** Two-step Postmortem Angiography with a Modified Heart-Lung Machine: Preliminary Results. *Am J Rad*. 2008, 190: 345-351.
12. **Bolliger Stephan A., Filograna Laura, Spendlove Danny, Thali Michael J., Dirnhofer Stephan, Ross Steffen.** Postmortem Imaging-Guided Biopsy as an Adjuvant to Minimally Invasive Autopsy With CT and Postmortem Angiography: A Feasibility Study. *Am J Rad*. 2010, 195: 1051-1056.

13. **Germerott Tanja, Preiss Ulrich S., Ebert Lars C., Ruder Thomas D., Ross Steffen, Flach Patricia M, Ampanozi Garyfalia, Filograna Laura, Thali Michael J.** A new approach in virtopsy: Postmortem ventilation in multislice computed tomography. *Legal Medicine*. 2010, 12: 276-279.

14. **Bolliger Stephan A., Thali Michael J., Ross Steffen, Buck Ursula, Naether Silvio, Vock Peter.** Virtual autopsy using imaging: bridging radiologic and forensic sciences. A review of the Virtopsy and similar projects. *Eur Radiol*. 2008, 18: 273-282.

15. Gangbare prijzen in Belgische onderzoekscentra.

16. **Christe Andreas, Flach Patricia, Ross Steffen, Spendlove Danny, Bolliger Stephan, Vock Peter, Thali Michael J.** Clinical radiology and postmortem imaging (Virtopsy) are not the same: Specific and unspecific postmortem signs. *Legal Medicine*. 2010, 12: 215-222.

17. **Jackowski Christian, Thali Michael, Sonnenschein Martin, Aghayev Emin, Yen Kathrin, Dirnhofer Richard.** Adipocere in Postmortem Imaging Using Multislice Computed Tomography (MSCT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI). *Am J Forensic Med Pathol*. 2005, 26: 360-364.

18. **Jackowski Christian, Christe Andreas, Sonnenschein Martin, Aghayev Emin, Thali Michael J.** Postmortem unenhanced magnetic resonance imaging of myocardial infarction in correlation to histological infarction age characterization. *Eur Heart J*. 2006, 27: 2459-2467.

19. **Andenmatten M.A., Thali M.J., Kneubuehl B.P., Oesterhelweg L., Ross S., Spendlove D., Bolliger S.A.** Gunshot injuries detected by post-mortem multislice computed tomography (MSCT): A feasibility study. *Legal Medicine*. 2008, 10: 287-292.

20. **Schnider J., Thali M.J., Ross S., Oesterhelweg L., Spendlove D., Bolliger S.A.** Injuries due to sharp trauma detected by post-mortem multislice computed tomography (MSCT): A feasibility study. *Legal Medicine*. 2009, 11: 4-9.

21. **Bolliger S.A., Preiss U., Glaeser N., Thali M.J., Ross S.** Radiological stab wound channel depiction with instillation of contrast medium. *Legal Medicine*. 2010, 12: 39-41.

22. **Thali MJ., Braun M., Buck U., Aghayev E., Jackowski C., Vock P., Sonnenschein M., Dirnhofer R.** VIRTOPSY -- scientific documentation, reconstruction and animation in forensic: individual and real 3D data based geo-metric approach including optical body/object surface and radiological CT/MRI scanning. *J Forensic Sci*. 2005, 50 (2): 428-42.

23. **Buck Ursula, Naether Silvio, Braun Marcel, Bolliger Stephan, Friederich Hans, Jackowski Christian, Aghayev Emin, Christe Andreas, Vock Peter, Dirnhofer Richard, Thali Michael J.** Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: With high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation. *For Sci Int*. 2007, 170: 20-28.

24. **Buck Ursula, Christe Andreas, Naether Silvio, Ross Steffen, Thali Michael J.** Virtopsy --- noninvasive detection of occult bone lesions in postmortem MRI: additional information for traffic reconstruction. *Int J Legal Med.* 2009, 123: 221-226.
25. **Buck Ursula, Naether Silvio, Braun Marcel, Thali Michael.** Haptics in forensics: The possibilities and advantages in using the haptic device for reconstruction approaches in forensic science. *For Sci Int.* 2008, 180: 86-92.
26. **Vetrungo Guisepe, De-Giorgio Fabio, Martello Simona, Chiarotti Marcello.** Is "Toxopsy" the next step after virtopsy? *Legal Medicine.* 2010, 12(2): 112.
27. **Thali Michael J., Jackowski Christian, Oesterhelweg Lars, Ross Steffen G., Dirnhofer Richard.** VIRTOPSY - The Swiss virtual autopsy approach. *Legal Medicine.* 2007, 9: 100-104.
28. **Aghayev Emin, Staub Lukas, Dirnhofer Richard, Ambrose Tony, Jackowski Christian, Yen Kathrin, Bolliger Stephan, Christe Andreas, Roeder Christoph, Aebi Max, Thali Michael J.** Virtopsy - The concept of a centralized database in forensic medicine for analysis and comparison of radiological and autopsy data. *J For Leg Med.* 2008, 15: 135-140.
29. **Remue, Alain.** *Cijfers Cel Vermiste Personen.* s.l. : Intern Document.
30. **Storto Maria L, Kee Stephen T, Golden Jeffrey A, Webb Richard W.** Hydrostatic pulmonary edema: high-resolution CT findings. *Am J Roent.* 1995, 165:817-820.
31. **Dunagan Donnie P, Cox Joseph E, Chang Michael C, Haponik Edward F.** Sand aspiration with near-drowning: radiographic and bronchoscopic findings. *Am J Respir Crit Care Med.* 1997, 156:292-295.
32. **Kim Kun-II, Lee Ki nam, Tomiyama Noriyuki, Johkoh Takeshi, Ichikado Kazuya, Kim Chang Won, Lee Suk Hong.** Near-drowning: thin-section CT findings in six patients. *Jl Comput Assist Tomogr.* 2000, 4:562-566.
33. **Christe Andreas, Aghayev Emin, Jackowski Christian, Thali Michael J, Vock Peter.** Drowning: post-mortem imaging findings by computed tomography. *Eur Radiol.* 2008, 18:283-290.
34. **Levy Angela D, Harcke Theodore H, Getz John M, Mallak Craig T, Caruso James L, Pearse Lisa, Frazier Aletta A, Galvin Jeffrey R.** Virtual Autopsy: two- and three-dimensional multidetector CT findings in drowning with autopsy comparison. *Radiol.* 2007, 243:862-868.
35. **Oliver J, Lyons TJ, Harle R.** The role of computed tomography in the diagnosis of arterial gas embolism in fatal diving accidents in Tasmania. *Australian Radiology.* 1999, 43:37-40.
36. **Cole A J, Griffiths D, Lavender S, Summers P, Rich K.** Relevance of postmortem radiology to the diagnosis of fatal gas embolism from compressed air diving. *J Clin Pathol.* 2006, 59:489-491.

37. **Ruder Thomas D., Hatch Gary M., Thali Michael J., Fischer Nadja.** One small scan for radiology, one giant leap for forensic medicine - Post-mortem imaging replaces forensic autopsy in a case of traumatic aortic laceration. *Legal Medicine*. 2011, 13: 41-43.

38. **Niels, Lynnerup.** Medical Imaging of Mummies and Bog Bodies - A mini review. *Gerontology*. 2010, 56: 441-448.

Bijlagen

Bijlage 1

Bron: **Harth Sebastian, Obert Martin, Ramsthaler Frank, Reuß Christina, Traupe Horst, Verhoff Marcel A.** Ossification Degrees of Cranial Sutures Determined with Flat-Panel Computed Tomography: Narrowing the Age Estimate with Extrema. *J Forensic Sci.* 2010, 55: 690-694

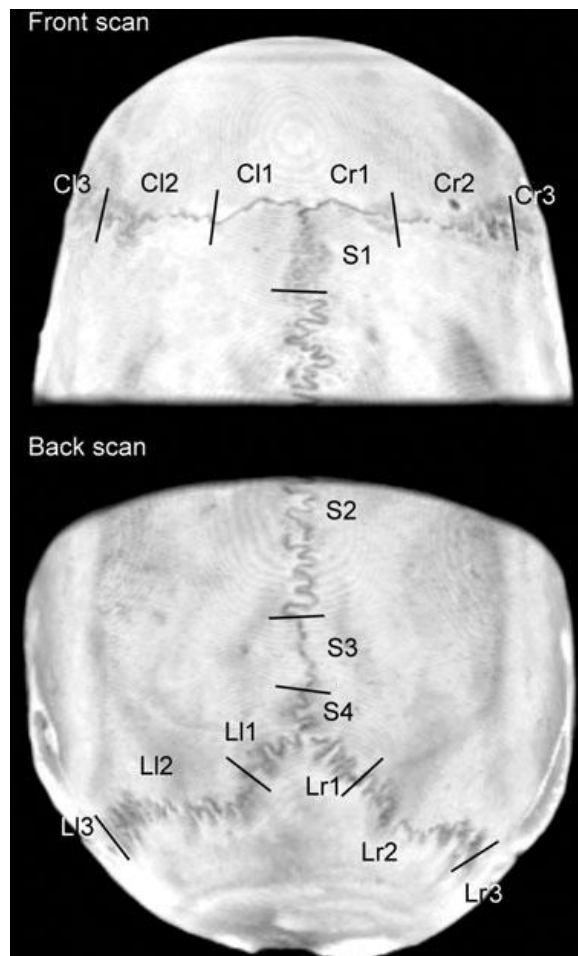


FIG. 1—Image of the ectocranial suture divisions as seen on a 3D overview when viewing the CT data with the Advantage Workstation, based on the suture division by Oppenheim (11,12). S, sagittal suture; C, coronal suture; L, lambdoid suture; r, right; l, left.

TABLE 1—Description of the seven stages of suture closure for the evaluation with flat-panel CT.

Stage - Percentage of Ossification (%)
0 Totally open - 0
1 Open, beginning closure - <10
2 Moderate closure - 10–33
3 Evident closure - 34–66
4 Considerable closure - 67–90
5 Closed, relics of the ossification process visible - >90
6 Total closure – 100

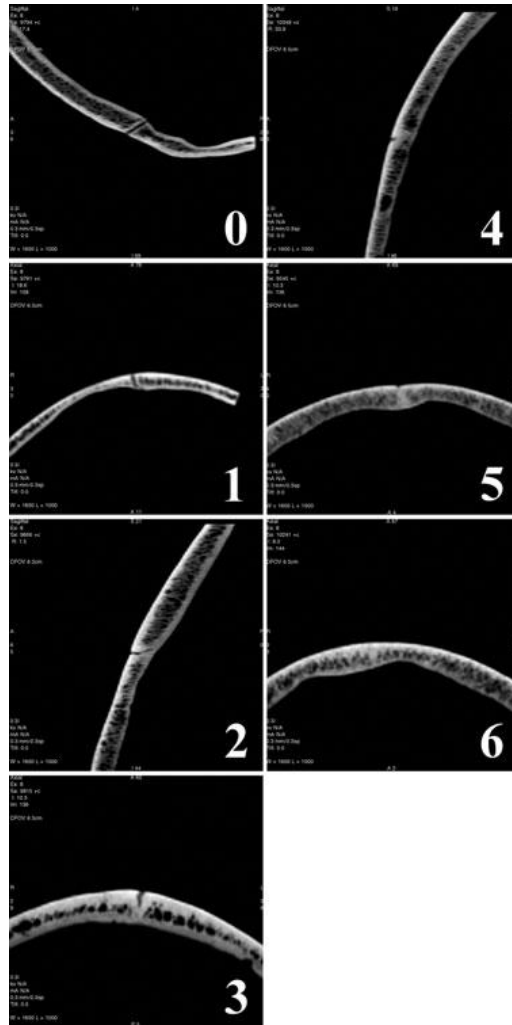


FIG. 2—Image of the seven stages of ossification as seen when viewing the CT data with the Advantage Workstation (compare Table 1).

Bron: **Thali Michael J., Markwalder Thomas, Jackowski Christian, Sonnenschein Martin, Dirnhofner Richard.** Dental Ct Imaging as a Screening Tool for Dental Profiling: Advantages and Limitations. *J Forensic Sci.* 2006, 51: 113-119.

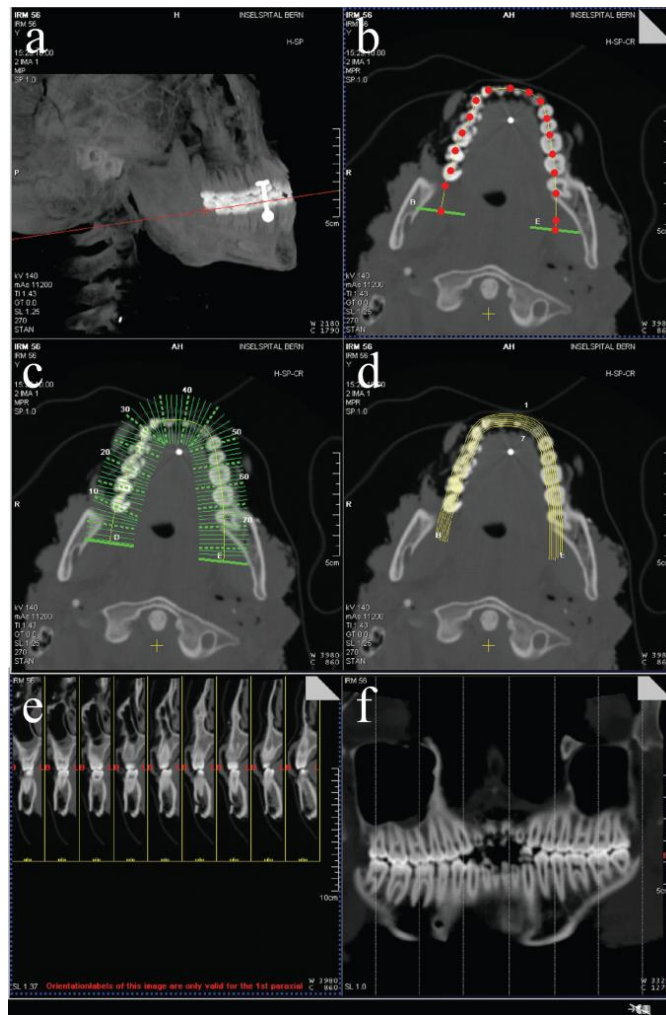


FIG. 1—Workflow using the Dentascan processing software. (a) On a lateral view of a 3-D transparent bone reconstruction of the skull, a level for an oblique section (b) is to be defined, that allows to appoint the centers of each tooth. Note an additional tongue piercing. (b) On the oblique cross section through the level of the teeth, the position of the teeth is manually defined by placing points on the image and thereby defining a curved reconstruction line. (c) Along that line, paraxial dental cross sections in a user-defined number and thickness are placed. (d) Parallel to the curved reconstruction line, up to 6 additional panoramic dental reconstructions in a slice thickness between 1 and 20mm can be created covering the teeth from lingual to buccal. (e) Several paraxial cross sections are exemplarily demonstrated. (f) Shown is one of the 7 created thin (1 mm) panoramic dental reconstructions that allows for a comparison with antemortem dental radiographs.

Bijlage 3

Bron: **Ruder Thomas D., Kraehenbuehl Markus, Gotsmy Walther F., Mathier Sandra, Ebert Lars C., Thali Michael J., Hatch Gary M.** Radiological identification of disaster victims: A simple and reliable method using CT of paranasal sinuses. *Eur J Radiol.* 2011, Epub Ahead of Print

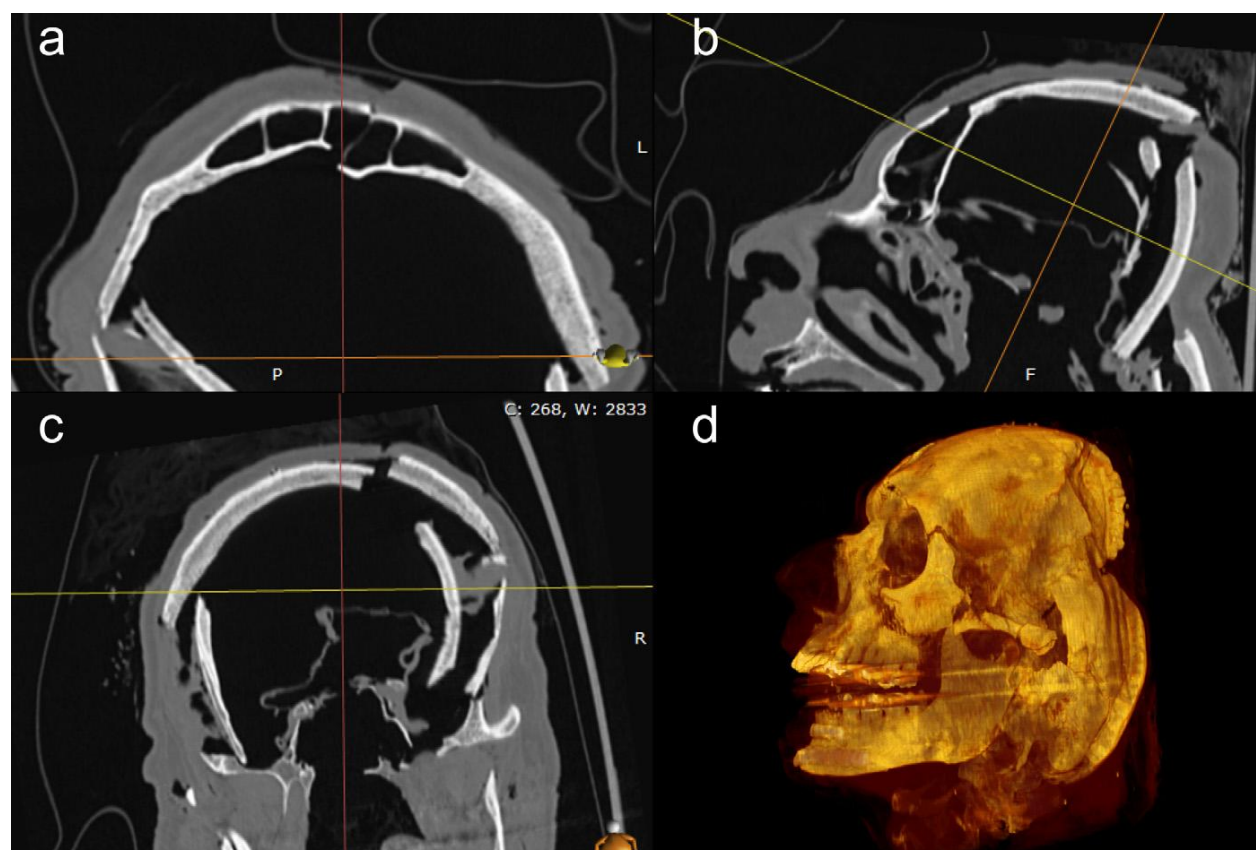


Fig. 4. Multiplanar reformatting (a:axial;b:sagittal;c:coronalimage) and volumerendering (d) of the same case as Fig. 3. Multiplanar reformatting allows for accurate orientation of the PMCT and facilitates comparison to AMCT. Note the comminuted fracture of the cranium.

Bijlage 4

1. Hoeveel ongeïdentificeerde lichamen of lichaamsdelen zijn er in België? Hoeveel hiervan zijn drenkelingen?
2. Wordt er forensische radiologie toegepast op niet-geïdentificeerde lichamen? Zo ja, welke technieken?
3. Worden er veel lichamen geïdentificeerd aan de hand van forensische radiologie?
4. Worden er radiologische gegevens bijgehouden van vermiste personen? Waar? Welke modaliteiten (RX-CT-MR-...)? Zo neen, is er mogelijkheid om dit te implementeren en dient het system hiervoor aangepast worden?
5. Worden de post mortem radiologische beelden internationaal uitgewisseld?
6. Wordt er bij de autopsie systematisch gebruik gemaakt van forensische radiologie? Welke technieken worden gebruikt? Is dit voor alle gerechtelijke centra hetzelfde?
7. Maakt het DVI gebruik van forensische radiologie? Gebruikt men deze ook ter plaatse?
8. Heeft het DVI een forensisch radioloog in zijn team of ter beschikking?
9. Is er budget om de forensische radiologie ten volle te benutten indien dit nog niet zo is?

Bron: Ebert Lars Christian, Ptacek Wolfgang, Naether Silvio, Fürst Martin, Ross Steffen, Buck Ursula, Weber Stefan, Thali Michael. Virtobot - a multifunctional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg.* 2010, 6: 18-27

THE INTERNATIONAL JOURNAL OF MEDICAL ROBOTICS AND COMPUTER ASSISTED SURGERY
Int J Med Robotics Comput Assist Surg 2010; 6: 18–27.
Published online 5 October 2009 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/rcs.285

ORIGINAL ARTICLE

Virtobot – a multi-functional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy

Lars Christian Ebert^{1,4*}
Wolfgang Ptacek³
Silvio Naether¹
Martin Fürst³
Steffen Ross¹
Ursula Buck¹
Stefan Weber²
Michael Thali¹

¹Institute of Forensic Medicine, University of Bern, Bühlstrasse 20, CH-3012 Bern, Switzerland

²Artorg Research Centre, University of Bern, Stauffacher Strasse 78, CH-3015 Bern, Switzerland

³PROFACTOR GmbH, Im Stadtgut A2, A-4407 Steyr-Gleink, Austria

⁴Institute for Surgical Technology & Biomechanics, University of Bern, Stauffacher Strasse 78, CH-3015 Bern, Switzerland

*Correspondence to:
Lars Christian Ebert, Institute of Forensic Medicine, University of Bern, Bühlstrasse 20, CH-3012 Bern, Switzerland. E-mail: Lars.Ebert@irm.unibe.ch

Accepted: 7 August 2009

Abstract

Background The Virtopsy project, a multi-disciplinary project that involves forensic science, diagnostic imaging, computer science, automation technology, telematics and biomechanics, aims to develop new techniques to improve the outcome of forensic investigations. This paper presents a new approach in the field of minimally invasive virtual autopsy for a versatile robotic system that is able to perform three-dimensional (3D) surface scans as well as post mortem image-guided soft tissue biopsies.

Methods The system consists of an industrial six-axis robot with additional extensions (i.e. a linear axis to increase working space, a tool-changing system and a dedicated safety system), a multi-slice CT scanner with equipment for angiography, a digital photogrammetry and 3D optical surface-scanning system, a 3D tracking system, and a biopsy end effector for automatic needle placement. A wax phantom was developed for biopsy accuracy tests.

Results Surface scanning times were significantly reduced (scanning times cut in half, calibration three times faster). The biopsy module worked with an accuracy of 3.2 mm.

Discussion Using the Virtobot, the surface-scanning procedure could be standardized and accelerated. The biopsy module is accurate enough for use in biopsies in a forensic setting.

Conclusion The Virtobot can be utilized for several independent tasks in the field of forensic medicine, and is sufficiently versatile to be adapted to different tasks in the future. Copyright © 2009 John Wiley & Sons, Ltd.

Keywords virtopsy; robotics; biopsy; surface scanning; photogrammetry; post mortem; autopsy

Introduction

Virtual autopsy, or Virtopsy[®] (1), originated with the goal of implementing radiological diagnostic imaging techniques [computed tomography (CT)/magnetic resonance imaging (MRI)] (2), three-dimensional (3D) photogrammetry and surface scanning, post mortem and minimally invasive biopsy for the benefit of forensic science. In 2000, it was presented as a systematic approach to complement or substitute for standard forensic

procedures (3). The aim of the Virtopsy project is to establish an observer-independent, objective and reproducible forensic assessment method with digitally storable results. The use of medical imaging techniques to support autopsy procedures has become more and more accepted in the forensic community. By fusing different diagnostic modalities, it is possible to depict a variety of injuries in a non-invasive manner without opening the body, thus avoiding destruction of potential evidence. Photogrammetry and surface scanning provide highly detailed and fully textured surface data, which can be matched to potential murder weapons or damage-inflicting materials. Investigations at a cellular level can be performed with histology. Body fluids such as blood or cerebrospinal fluid (CSF) can be used for toxicological analysis. However, these techniques require uncontaminated samples of body fluids and tissue samples, which cannot be delivered reliably by standard autopsy methods. Image-guided biopsy is therefore part of the Virtopsy project.

In order to perform a broad range of repetitive tasks with both high speed and accuracy in the field of forensic medicine, a multi-functional robotic system named the Virtopsy Robot, or Virtobot, was developed. Because of their high accuracy, robots have been used to enhance the outcome of a range of medical interventions (4). In combination with CT, they allow for precise needle placement for brachytherapy or biopsy (5,6). Coupled with a surface scanner, robots can help to fully automate the task of generating highly detailed surface models (7). However, building a robot that is able to perform different tasks is a challenging endeavour, due to sometimes contradicting constraints, such as the requirement for different distances from the end-effector to the body, different workloads and differing accuracy requirements. Nevertheless, two particular key tasks of the Virtobot discussed in this paper show significant progress at this stage of development: automatic surface scanning and minimally invasive biopsy.

Morphological assessment is a common step in the autopsy process. Digital photogrammetry and optical surface scanning provide the means to collect 3D digital data on external morphologies. Since the resolution of CT- and MRI-based surface models is limited by the slice thickness and contains no colour information, optical surface scanning and photogrammetry are of great value. These can be fused with CT and MRI data to yield a complete and fully textured 3D model of a human body. Based on 3D data models of the internal and external body and digitized presumed injury-inflicting instruments, real data-based reconstructions of traffic accidents and homicides are possible (8–11). Positioning the scanner manually is time consuming and requires two operators with considerable experience. A robot is beneficial for this task, since it allows scanning of predefined positions that have been shown to yield optimal surface scans.

Harvesting tissue samples is a necessary procedure for forensic investigations at the cellular level and is often critical to the outcome. Small lesions may be

difficult to detect and incorrect sampling may lead to erroneous results. Image guided (CT-fluoroscope) (12) and navigated biopsy (13) provide the means to accurately localize small lesions, avoiding contamination or incorrect sampling, but these technologies may pose a significant radiation exposure risk to the examiner, who must be trained and skilled in order to achieve reasonable accuracy. Using robotic assistance for this task eliminates examiner exposure while ensuring accurate localization of the biopsy.

This paper introduces our approach to the design of a multi-purpose robotic system that integrates CT, surface-scanning, photogrammetry, biopsy and angiography technologies to address different challenges in forensic medicine.

Materials and Methods

The Virtopsy system

The Virtopsy system at the Institute of Forensic Medicine in Bern, Switzerland, consists of the following main components: a multi-slice CT (MSCT) scanner (Somatom Emotion 6, Siemens, Germany), a modified heart–lung machine for postmortem angiography (HL20, Maquet, Germany) (14), a high-resolution optical digitizing system (TRITOP/ATOS, GOM mbH, Germany), a high-precision optical tracking system (Optotrak, NDI, Canada) and the Virtobot sub-system, which includes a robotic manipulator that can be equipped with different end-effectors.

The Virtobot sub-system

The Virtobot sub-system was developed by PROFACTOR GmbH (Steyr-Gleink, Austria). Its main motion components include a six-axis robotic arm (Stäubli TX90L Robotic Arm, Stäubli AG, Switzerland) and a 4 m long ceiling-mounted linear axis (Figure 1). The six-degrees of freedom arm has a maximum load capacity of 15 kg, a reach of 1.2 m and a positioning repeatability of ± 0.035 mm, according to ISO 9283. This particular manipulator was selected for its high protection class, slim housing and payload:workspace ratio. The working volume of the robot (manipulator + linear axis) was designed to accommodate access to the entire subject, provide a safe space for tool changing and provide a parking position that ensures enough free space around the subject for CT scanning and examiner access (Figure 2). Currently, two interchangeable end-effector modules can be attached to the robotic arm to perform body surface scanning and needle-placing tasks.

3D surface scanning and photogrammetry

Precise 3D surface models are generated with an end-effector module that incorporates the GOM TRITOP/ATOS III system (GOM, Braunschweig, Germany).

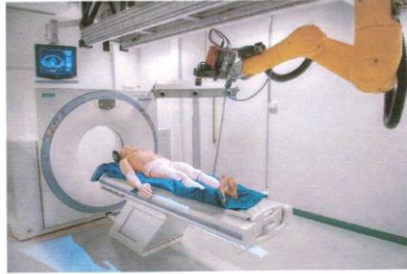


Figure 1. Virtobot set-up with CT scanner, Virtobot with mounted surface scanner and Optotrak tracking system in the background



Figure 2. Tool stand with Virtobot in parking position. Left to right: needle holder, surface scanner and biopsy module. Bottom right: needle placement sequence with (a) needle retracted and (b) needle extended

The TRITOP component of this system is based on multi-image photogrammetry (15,16). Digital photos are taken with a Nikon D2X digital camera (Nikon Corp., Japan) and submitted wirelessly to the TRITOP system. Coded reference targets and scale bars are applied to the body, and their position is automatically calculated during photogrammetry. These data are then used to automatically fuse the surface scans performed with the ATOS component. The images taken are also utilized to texture the surface models.

The ATOS optical surface-scanning system is based on the principle of triangulation. The sensor head consists of a projection unit in the middle and two CCD cameras mounted beside the projector. Fringe patterns are projected onto the surface of the measuring object and observed by the cameras. The data are transferred to the computer and the software calculates up to 4 million 3D surface points per single measurement within seconds.

The optimal scanning distance of the surface scanner is 61–103 cm.

Robot-assisted biopsy

The biopsy module used in this system was developed to accurately place introducer needles to biopsy regions identified by our custom planning and navigation software. The robotic biopsy end-effector (PROFACTOR GmbH, Austria) consists of a linear pneumatic actuator that can apply 70 N (max) of force over 100 mm of travel, a pneumatic gripper for holding and releasing biopsy needles, an array of optoelectronic markers that can be tracked by the navigation system to confirm positioning, and a targeting laser that identifies the skin piercing point for manual incisions to aid needle introduction and minimize needle bending.

The automatic biopsy cycle begins with the robot moving to the needle magazine (Figure 3) to grasp a needle. Once a needle has been acquired, the robot moves to the planned position in two stages: a fast motion to a nearby point, followed by a slower, more accurate and safer motion to the final destination. The tool position is confirmed by the navigation system and corrected automatically if necessary. If incisions are required due to inadequate skin properties, they are performed at this point with the aid of the targeting laser. Finally, the pneumatic actuator, which is the retracted position prior to this point, is fully extended to reach the target point (Figure 2, bottom right). Once the target point is reached, the needle is released by the gripper and the robot returns to the start position of the cycle.

To minimize needle bending during insertion (17), stiffer coaxial introducer needles (13 gauge \times 10.3 cm) with symmetrical tips are used in place of standard biopsy needles. This facilitates either manual tissue biopsy using the introducer needles to guide standard biopsy needles, or liquid sampling from the heart or bladder, which is not possible with conventional biopsy needles. Correct localization relative to the plan can be further confirmed following an additional CT scan.

Semi-automatic tool changing

Differing cable and plug configuration requirements for the two robot end-effectors eliminated the possibility for a fully automated tool-changing mechanism. Therefore, a manual system Schunk HWS 50 (Schunk GmbH & Co. KG, Germany) was selected. During a tool change, the robot moves to the corresponding tool station and stops at a specified distance above the module (Figure 4). The operator then completes the mechanical coupling and cable connections between the module and robot manually. A set of dedicated sensors checks for correct tool changing before allowing further processing steps.

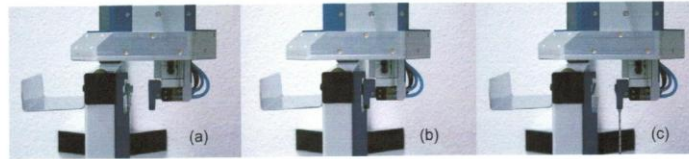


Figure 3. Needle grasp sequence: (a) approach the defined needle; (b) grasp the needle; (c) take the needle out of the safety zone to a standby position

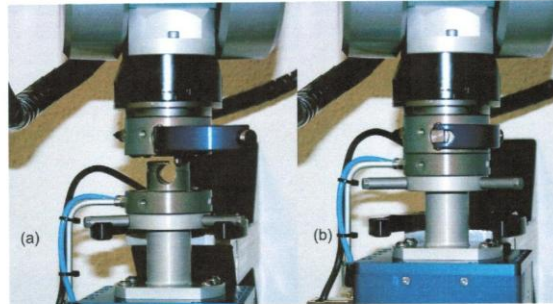


Figure 4. Tool-locking mechanism: (a) unlocked and (b) locked

Safety issues

Due to the complex equipment and process requirements of the Virtopsy system, several standard and custom safety protocols have been devised and implemented. For example, a light curtain (Safety Class 4) installed at the entrance to the robotic cell complements the standard button-operated emergency stops and suspends robot movement immediately. A key-operated bypass of the light gate is also available, which completely restricts robot motion to allow safe access to the robotic cell in order to perform manual operations (e.g. changing tools, performing skin incisions). The system state is indicated visually by a signal lamp. A second light curtain, installed along the housing of the CT-scanner, protects against collisions between the robotic arm and the CT scanner (safety class 2) and is also wired into the emergency stop circuit of the robot.

In general, the maximum speeds of moving elements have been reduced to an appropriate value for each application. Movements considered to be safe are performed at higher speeds than movements for more critical processes or in more critical areas. For example, the area close to CT as well as the area around the tool stand is critical, due to the potential for hardware damage. The Virtopsy robot controller (VRC) allows only predefined motion of the robot in these areas and has specific protocols for emergency stops (Figure 5).

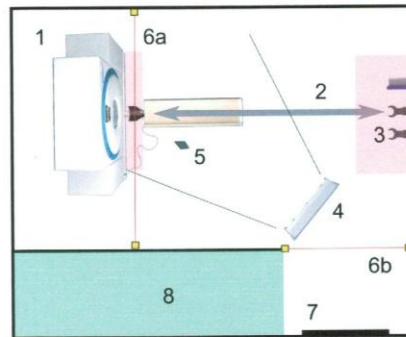


Figure 5. Plan view of the Virtopsy examination room: 1, CT scanner and safety area; 2, motion range of the Virtobot on its linear axis; 3, tool stand with low-speed safety area; 4, ceiling-mounted Optotrak tracking system with view volume; 5, world marker shield mounted to the floor; 6, light barriers; 7, entrance; 8, X-ray shielded workstation area

All robot cabling up to the end-effector remains connected to a switch box on the distal arm of the robot at all times, eliminating the potential hazard of disconnected cables. Each end-effector tool has a unique identification number that is checked at every tool change.

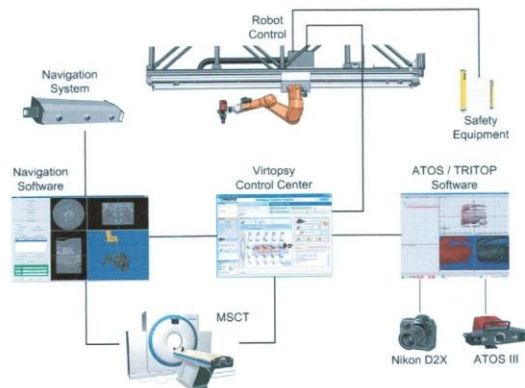


Figure 6. Structure of the Virtopsy system. The Virtopsy control centre synchronizes different hardware and software packages to gather complex multi-modal information

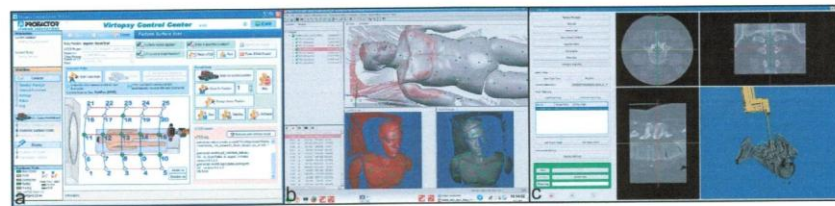


Figure 7. Screenshots of software packages in use. (a) Virtopsy control centre (VCC): selection of scanning positions for surface scan. (b) Screenshot ATOS: surface model composed several single surface scans. (c) Screenshot planning and navigation station: trajectory-planning module with multi-planar reconstruction and volume representation of a CT dataset. Final position of the robot is superimposed

This identification ensures that the robotic system is aware of the tool it is carrying, and therefore of its geometric extent, so as to avoid collisions.

Software

Several software packages are used to control and monitor the functions of the Virtopsy system. These packages are distributed on different computers with different operating systems (Figure 6), but are all controlled and managed remotely by a single software package, the Virtopsy control centre (VCC), via standard TCP/IP communication protocols.

Virtopsy control centre (VCC)

The VCC (PROFACTOR GbmH, Austria) is a custom software package that coordinates all the other software packages of the system (navigation and planning software, photogrammetry and surface-scanning software and

robot control) while providing basic functionality of its own, such as process parameter control, a patient database, basic failsafe mechanisms for the robot and debugging (Figure 7). Once a 3D surface-scan project is started, several predefined robot positions for scanning can be selected. The scanning process for all selected positions and involving all necessary applications is done automatically by the VCC. This system prevents the robot from running into singularities and is sufficient for standard scans. If necessary, special regions of the body can be scanned more accurately by manually adjusting the robot position via the VCC. Guided by the VCC, the operator can initiate and manage CT scans of the body. The VCC links diagnostic information, processes data from photogrammetry and surface scanning and stores the data appropriately for the specific patient. The session manager collects all data produced and documents the whole process of the Virtopsy procedure. The VCC guides the user through the entire Virtopsy workflow and reminds the user to perform necessary steps by means of checkboxes. Until checked, functions that require user

action are blocked. Examples for such checkboxes include placing the floor marker shield for biopsy and positioning the CT table at a predefined height for surface scanning. This way, the user follows a predefined, standardized protocol, even with little training.

Virtopsy robot control (VRC)

The VRC application (PROFACTOR GmbH, Austria) is responsible for coordinating the motion elements of the Virtobot (robot and external axis). It interprets and executes the high-level robot commands from the VCC. To ensure collision avoidance, every motion is precalculated in the VRC, using volume obstacle avoidance algorithms, before any motion actually takes place. Additionally, dangerous areas (such as the CT scanner) are protected by safety equipment hardware.

Photogrammetry and 3D surface-scanning software for documentation of external findings

Photogrammetry and 3D surface scans are driven by the applications GOM TRITOP (version 6.1.4) and GOM ATOS (version 6.1.4), which run under Linux. A series of macros that can be executed remotely by the VCC have been implemented for the creation and storage of relevant data (Figure 7). The ATOS software can also be used to calibrate the surface scanner if the lenses have been changed or the accuracy of the system is decreasing. For this, a special calibration phantom is scanned from different positions and angles.

Planning and navigation application

Trajectories for the biopsy procedure are defined in the planning and navigation software (Artorg Research Centre and Institute of Forensic Medicine, University of Bern, Switzerland), which is based on the Co-Me medical application framework Marvin (18), developed at the Artorg Research Centre (Bern, Switzerland). Its functionality includes a patient database, DICOM support, modules for registration and trajectory planning and a TCP/IP interface to the VCC. Trajectory data include the target point, the entry point of the needle and the orientation of the robot. The orientation is necessary to plan a collision-free needle release motion as well as to position optimally the marker shield relative to the tracking system. In combination with the known penetration depth of the linear pneumatic actuator, the final position of the robot can be calculated. After a reachability check with the VCC, the trajectory data is submitted and the needle placed by the robot accordingly (Figure 7).

Transformations

There are a number of coordinate systems used to define the spatial position of objects and data in the Virtopsy system (Figure 8): a camera coordinate system (CCS), a robot coordinate system (RCS) and an image coordinate system. Optical tracking is performed in the CCS, where the relative position of the image data, body and robot can be determined. The image is registered to the optoelectronic marker shield attached to the body by using paired point matching (19) and the restricted surface-matching algorithm (20). Positions of the robotic end-effectors are defined in the RCS, which has its origin

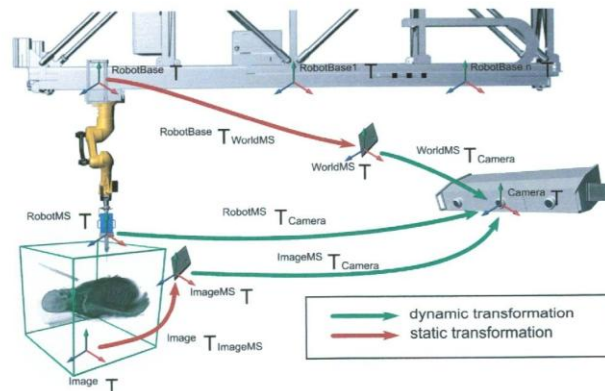


Figure 8. Transformations used for biopsy. Green transformations are generated by optical tracking of optoelectronic marker shields; red transformations are rigid and registered once

at the robot's base and therefore moves along with the external axis carriage. Trajectories are planned in the local image coordinate system of the CT, and must be converted to the RCS to correctly drive the robot. The transformation between these coordinate systems therefore must be known. This transformation is determined by introducing an optoelectronic marker shield that is rigidly attached to the floor and serves as an anchor between RCS and CCS. The robot is pivoted around a series of points in space while optically tracking the marker shield. The pivoting centre is calculated and paired point matching is then applied to both point sets, as shown in Figure 9. This calibration is repeated for predefined positions of the external axis.

The transformation from the image coordinate system to the RCS is then calculated by:

$$\begin{aligned} \text{Image}T_{\text{RobotBase}} &= \left(\text{RobotBase}T_{\text{WorldMS}} \right)^{-1} \\ &\cdot \left(\text{WorldMS}T_{\text{Camera}} \right)^{-1} \\ &\cdot \text{ImageMS}T_{\text{Camera}} \cdot \text{Image}T_{\text{ImageMS}} \end{aligned}$$

After positioning the robot at a planned location, a correction vector can be determined by transforming the tracked position of the robot to the image coordinate system and comparing it to the planned trajectory:

$$\begin{aligned} \text{RobotMS}T_{\text{Image}} &= \left(\text{Image}T_{\text{ImageMS}} \right)^{-1} \\ &\cdot \left(\text{ImageMS}T_{\text{Camera}} \right)^{-1} \cdot \text{RobotMS}T_{\text{Camera}} \end{aligned}$$

The calculated correction vector is then shifted back to the RCS by applying $\text{Image}T_{\text{RobotBase}}$. The correction function

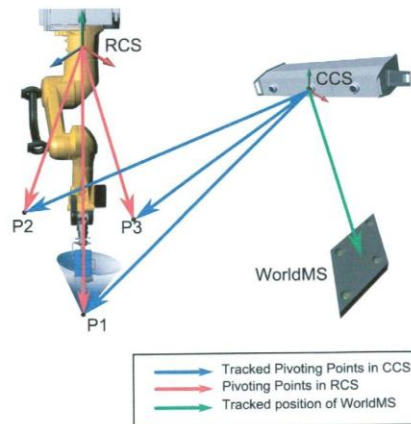


Figure 9. Calculating $\text{RobotBase}T_{\text{WorldMS}}$ by pivoting the Virtobot while tracking

Copyright © 2009 John Wiley & Sons, Ltd.

can be used, to correct for accidental body motion after registration.

Biopsy phantom and accuracy measurement

To measure the accuracy of the biopsy module, a phantom was developed based on the one designed for our manual biopsy accuracy study (13). Unlike the original phantom, the new phantom is composed of a combination of wax and oil instead of gelatin. In this way, increased stability of the introducer needle and better CT contrast can be obtained. After removing the needle, its path can be clearly displayed on a CT volume dataset (Figure 10). For registration, six radio-opaque markers were attached to the phantom. Peas were embedded within the wax to act as biopsy targets. For every needle placement, the whole workflow including calibration and registration was repeated, not including the correction function. The accuracy after needle placement was determined by performing a second CT scan, prolonging the needle trajectory and measuring its distance from the centre of the pea. Registration and calibration accuracy was determined by calculating the RMS.

Results

Virtopsy workflow

The workflow of a Virtopsy examination is implemented and supervised by the VCC. This workflow requires the initial placement of coded markers and scale bars for photogrammetry and uncoded markers for the automatic fusion of the single surface scans, as well as radio-opaque markers to provide information for the fusion of the CT and surface data (Figure 11).

A Virtopsy procedure can include the following steps, depending on the desired output:

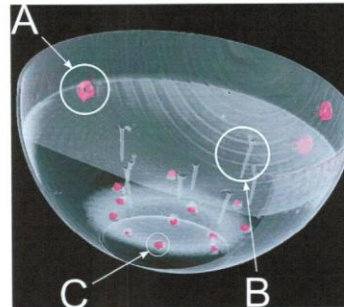


Figure 10. Volume rendering of the biopsy phantom showing radio-opaque markers (a) needle trajectories (b) and targets (c)

Int J Med Robotics Comput Assist Surg 2010; 6: 18–27.
DOI: 10.1002/rsa



Figure 11. 3D dataset of a suicide headshot, composed of CT, MRI and surface-scanning data. (Top left) Coloured 3D surface model of the muzzle imprint. The entrance wound is surrounded by non-coded reference targets and multi-modality radiographic markers

- Photogrammetry.
- Surface scanning.
- CT/angiography.
- Biopsy.

For photogrammetry, the body is placed in a supine position on a vacuum mattress that keeps it stable for moving or turning. The photogrammetric images are taken free-hand from different viewing angles and automatically transferred to the TRITOP software via wireless LAN and processed.

After calculating the photogrammetric images, the coded reference targets are removed and the surface scanner is mounted to the robot. The scanning positions are selected in the VCC and a whole-body scan is then performed automatically. Following surface digitization, a CT scan is performed. Angiography may also be performed at this time if required.

To perform a robotic biopsy, radio-opaque markers are attached to the body and used for image registration and fusion of the different modalities used. Planned needle insertion trajectories are sent to the control station and, after a validity check, introducer needles are automatically placed by the robot. A second CT may be performed at this time to confirm placement and then the actual biopsies are performed manually, using the introducer needles as guides.

Virtobot surface scanning

Since its installation in 2008, the Virtobot has provided robotic assistance for automated surface scanning in 52 cases: 26 victims of traffic accidents, 10 cases of blunt

trauma, six knife wounds, five gunshot wounds, three scans of bite marks and two cases of strangulation. Of those 52 cases, 19 scans were included in court forensic reports, all of them showing damage-inflicting structures in relation to wound topology. Three cases were published in scientific journals. With a tripod, a manual surface scan of one side of a victim takes approximately 30 min. By using the Virtobot, this time was decreased to approximately 15 min. Calibration time of the scanner was reduced from 12 to 4 min using the robotic system.

Virtobot biopsy: preliminary accuracy study

In order to determine the accuracy of needle placement, a preliminary accuracy study was performed based on the wax biopsy phantom. Calibration of the robot to the world marker shield was performed with six pivot points and a mean RMS of 2.3 mm (± 0.04 mm, $n = 13$). The cone centre for every pivot point was determined with an accuracy of 0.5 mm (0.06 mm, $n = 78$). Two phantoms were prepared and a total of 13 needles were set. The mean accuracy was 3.2 mm (± 1.9 mm, $n = 13$).

Discussion

Summary and next steps

The Virtobot is the robotic component of the Virtopsy platform, which was integrated into the system in early 2008 and extended with the biopsy module beginning of

2009. This tool was designed to automate some of the more complex or laborious manual operations performed during a forensic exam, while improving accuracy, increasing speed and reducing operator exposure to radiation or infectious body fluids. Currently, the Virtobot comprises a robotic manipulator, external linear motion axis, two different end-effectors and dedicated control hardware and software. The two end-effector modules include one that facilitates automatic surface scanning of a body and another that facilitates robot-assisted biopsies.

Several challenges arose during the integration of the Virtobot into the Virtopsy system, including: selection of components for operational flexibility, carriage loading, data collection and operator and equipment safety; integration of the robotic motion control with the planning and navigation, surface-scanning and photogrammetry software applications; design of end-effectors to perform surface scanning and biopsy functions; and calibration and verification of the various devices used to ensure accurate operation.

The design of the Virtobot's motion components is sufficiently flexible to provide positioning and articulation that accommodates both surface-scanning and biopsy modules, despite their substantially different requirements. Surface scanning is performed in an envelope around the body at an optimal distance from its surface, while biopsies require the robot to work within the body volume and in close proximity to the body and CT table.

Different independent software packages, such as CT software, Syngo MMWP (VE23A, Siemens AG, Germany), TRITOP, ATOS and Marvin, are integrated by the VCC to fit the needs of forensic medicine. The VCC application guides the user through the standardized process of a Virtopsy and synchronizes the different software packages in use. This helps to minimize errors and leads to better, more reproducible results.

Surface scanning

The set-up described above was installed at the Institute of Forensic Medicine Bern in Spring 2008, and has been used in daily routine since then. The surface-scanning procedure, which has been used manually and has proved to be a valuable tool over the last 6 years, could be further optimized by integrating it to the Virtobot system.

A standard manual surface scan requires the operator to move the stand with the mounted scanner to optimal scanning positions. Usually, two persons are required for this procedure – one moving and placing the sensor head, and the other operating the system and supervising the measurements. By using the Virtobot for surface scanning, we now can assure optimal results by placing the scanner within the optimal scanning distance of 61–103 cm for every corpse. Due to the extensive automation, the surface-scanning module can be operated without special training after a quick introduction, and the system can be used by a single operator. The overall scanning

and calibration times could be reduced significantly by additionally optimizing the workflow.

Next stage – CT-guided biopsies

The combination of the Virtobot with a CT scanner and an optical tracking system allows for robotic biopsy based on CT imaging while limiting the examiner's exposure to radiation or potentially infectious body fluids. For standard forensic biopsies, an accuracy of <5 mm is required, which is already accomplished by the system as shown. However, an accuracy of 2 mm or better is expected for scientific purposes. Our preliminary study identifies the registration of the robot to the world coordinate system as the main source of error. Although the pivoting error during calibration is small, the combination of different pivoting points through paired point matching led to a much larger error; however, we believe that a bad calibration of the tracking system or a high absolute positioning error of the robot might lead to this calibration error. Apart from this, the definition of pivot points has a direct influence on the outcome of the registration, and an optimal positioning has yet to be determined. Therefore, further tests of the accuracy of components involved and the definition of better pivot positions are necessary.

Although a radiologist is required to interpret the CT data and identify biopsy targets, trajectory planning and biopsy can be performed with very little training. The planning and navigation software can be decoupled from the rest of the system, which theoretically allows for tele-biopsy, in which trajectories could be planned by experts not present in the Virtopsy examination room. Currently, registration of the CT dataset to the marker shield is done manually, which is time consuming and requires a second person. Increasing the accuracy and implementing an automatic registration algorithm are future developments towards optimizing the biopsy procedure. Although the first tests look promising, the results should be confirmed via an extensive accuracy study before starting trials on human cadavers.

Further possible extensions of the system

Development of the Virtobot is ongoing. Among the various planned optimizations, the next step is the development of a module that is able to perform the photogrammetry procedure in a more automated manner. The current use of flashlights reduces the overall texture quality, due to shadowing. At the moment, additional images are taken with a tripod, using long exposure times, to overcome this problem. Mounting the photographic camera on the robot arm could replace and fully automate this time-consuming procedure. Additionally, this could eliminate the necessity of placing coded and uncoded reference markers, since the exact positions of the robot

during imaging and surface scanning are known to the system for further calculations.

Conclusion

This paper introduces a new concept for a versatile robotic system that is able to perform different independent tasks in the field of minimally invasive virtual autopsy. A surface-scanning module has been developed as along with a module for robotic CT-based biopsy. Other modules, such as for automated photogrammetry, are under currently development or are being evaluated. The system described here allows for constant quality of recorded data and has a short training time. Despite the high initial costs of the complete system, including CT, navigation, surface scanner and robot, the Virtobot system has already proved to be a useful tool in virtual forensic autopsy and has not yet reached its full potential.

Acknowledgements

The authors would like to thank Urs Rohrer, Erland Mülheim and Ulrich Kindler for technical support. They would also like to thank Paul Thistlethwaite for reading the manuscript and Sandra Mathier for CT scanning. The Virtobot was funded by the Institute of Forensic Medicine and developed by PROFACTOR GmbH in collaboration with the Artorg Research Centre and GOM mbH. This research has been supported by the NCCR Co-Me of the Swiss National Science Foundation.

Disclosure

PROFACTOR GmbH is planning to commercialize the Virtobot and the VCC software after its successful evaluation.

References

- www.virtopsy.com.
- Lundberg GD. Low-tech autopsies in the era of high-tech medicine: continued value for quality assurance and patient safety. *JAMA* 1998; **280**(14): 1273–1274.
- Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, et al. Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by post mortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) – a feasibility study. *J Forensic Sci* 2003; **48**(2): 386–403.
- Cleary K, Melzer A, Watson V, et al. Interventional robotic systems: applications and technology state-of-the-art. *J Min Inv Therapy Allied Technol* 2006; **15**(2): 53–64.
- Kettenbach J, Kronreif G, Melzer A, et al. Ultrasound-, CT- and MR-guided robot-assisted interventions. In *Image Processing in Radiology – Current Applications*, Neri E, Caramella D, Bartolozzi C (eds). Springer Verlag: Berlin, 2008; 391–408.
- Kronreif G, Fürst M, Ptacek W, et al. Robotic platform B-RobII: *in vitro* tests and results. Proceedings of the 4th International Conference on Computer-aided Surgery Around the Head, Innsbruck, Austria, 21–24 February 2007.
- Minning S. Ökonomische Betrachtung der optischen Messtechnik vor und nach Optimierung des Verfahrens. Diploma Thesis, University of Applied Sciences Magdeburg; 39 pp.
- Thali MJ, Braun M, Buck U, et al. Virtopsy – scientific documentation, reconstruction and animation in forensics: individual and real 3D data-based geometric approach including optical body/object surface and radiological CT/MRI scanning. *J Forensic Sci* 2005; **50**(2): 428–424.
- Thali MJ, Braun M, Dirnhof R. Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries. *Forens Sci Int* 2003; **137**(2–3): 203–208.
- Thali MJ, Braun M, Wirth J, et al. 3D surface and body documentation in forensic medicine: 3D/CAD photogrammetry merged with 3D radiological scanning. *J Forensic Sci* 2003; **48**(6): 1356–1365.
- Buck U, Naether S, Braun M, et al. Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: with high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data-based animation. *Forens Sci Int* 2007; **170**: 20–28.
- Aghayev E, Thali MJ, Sonnenschein M, et al. Post-mortem tissue sampling using computed tomography guidance. *Forens Sci Int* 2007; **166**(2–3): 199–203.
- Aghayev E, Ebert LC, Christe A, et al. CT-based navigation for post-mortem biopsy – a feasibility study. *J Forensic Legal Med* 2008; **15**(6): 382–387.
- Ross S, Spendlove D, Bolliger S, Gygax E, et al. postmortem whole-body CT angiography: evaluation of two contrast media solutions. *AJR Am J Roentgenol* 2008; **190**(5): 1380–1389.
- Reich C, Ritter R, Thesing J. 3D-shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection. *Opt Eng* 2000; **39**(1): 224–231.
- Behring D, Thesing J, Becker H, et al. Optical coordinate measuring techniques for the determination and visualization of the 3D displacement in crash investigations. *Soc Autom Eng* 2003; **SAE-SP 1773**: 225–231.
- Abolhassani N, Patel R, Moallem M. Needle insertion into soft tissue: a survey. *Med Eng Phys* 2006; **29**(4): 413–431.
- Rudolph T, Puls M, Anderegg C, et al. MARVIN: a medical research application framework based on open source software. *Comput Methods Programs Biomed* 2008; **91**(2): 165–174.
- Arun KS, Huang TS, Blostein SD. Least-squares fitting of two 3D point sets. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell* 1987; **PAMI-9**(5): 698–700.
- Gong J, Richard, Bächler R, et al. Restricted surface matching: a new approach to registration in computer assisted surgery. *CVR Med* 1997; 597–605.

Bijlage 6

Bron: www.virtopsy.com



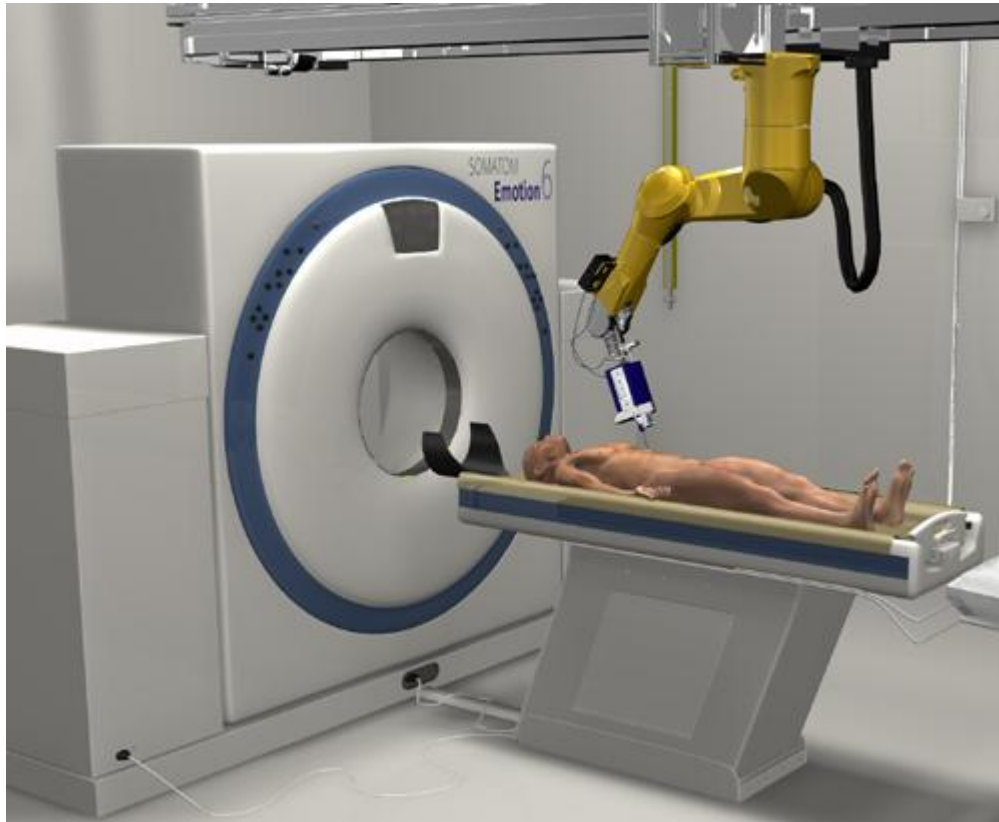
Virtobot setup (early and latest stage) in the Virtopsy examination room



Heart lung machine, used for post mortem CT angiography. Six-row multislice CT-scanner (Siemens Somatom 6) with flouroscopy package and two external, network connected Leonardo workstations.



3D optical surface scanner - The GOM ATOS III 3D digitizer is an optical measuring machine, based on the principle of triangulation. Projected fringe patterns are observed with two cameras. The data are transferred to a high end PC. 3D coordinates for each camera pixel are calculated with high precision. A polygon mesh of the object is created. The 3D surface scanner is mounted on the robot arm for an automatic surface documentation of the whole body.



The Virtobot biopsy module is mounted onto the Virtobot system and allows for precise needle placement. The trajectories are planned by using CT volume data sets. The placement procedure works in conjunction with an optical surgical navigation system, similar to the ones used in neuro- or orthopaedic surgery. The navigation system consists of a computer system, a touchscreen and an optical tracking system (Polaris). This type of needle placement can be used for minimally invasive post mortem tissue and liquid sampling.



Magnetic Resonance (MR) is a medical imaging method, based on the magnetic properties of tissues, providing excellent tissue detail, in organs such as the brain, heart, abdominal organs, and other soft tissues. In November, 2009, the Center of Forensic Imaging and Virtopsy went live with a Siemens Magnetom/Symphony (Siemens, Germany), the first 1.5 Tesla TIM (Total Imaging Matrix) MR dedicated solely to forensic imaging.

Bijlage 7

Bron: **Bolliger S.A., Preiss U., Glaeser N., Thali M.J., Ross S.** Radiological stab wound channel depiction with instillation of contrast medium. *Legal Medicine*. 2010, 12: 39-41

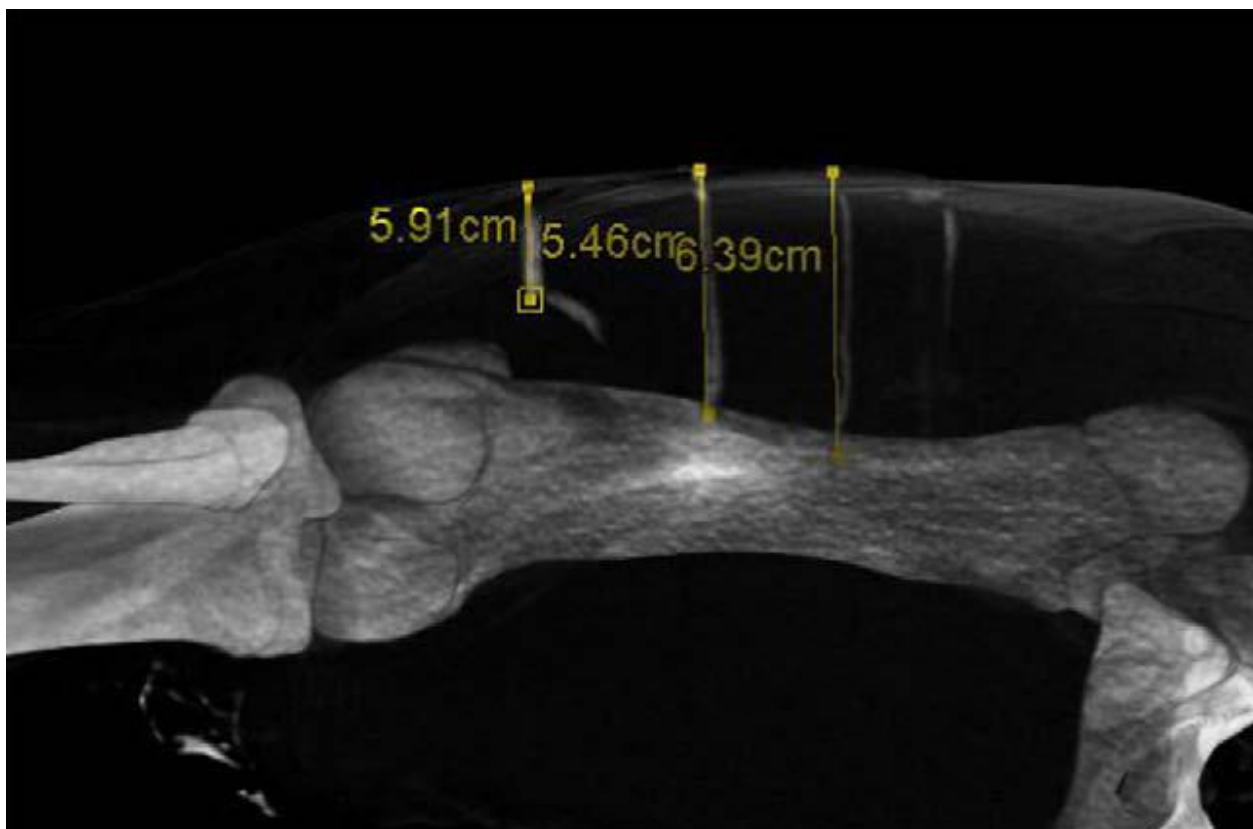


Fig. 4. MSCT, semitranslucent reconstruction. The length of the wound channels can be measured accurately by the Leonardo syngo CT software.

Bijlage 8

Bron: **Buck Ursula, Naether Silvio, Braun Marcel, Bolliger Stephan, Friederich Hans, Jackowski Christian, Aghayev Emin, Christe Andreas, Vock Peter, Dirnhofer Richard, Thali Michael J.** Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: With high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation. *For Sci Int.* 2007, 170: 20-28.

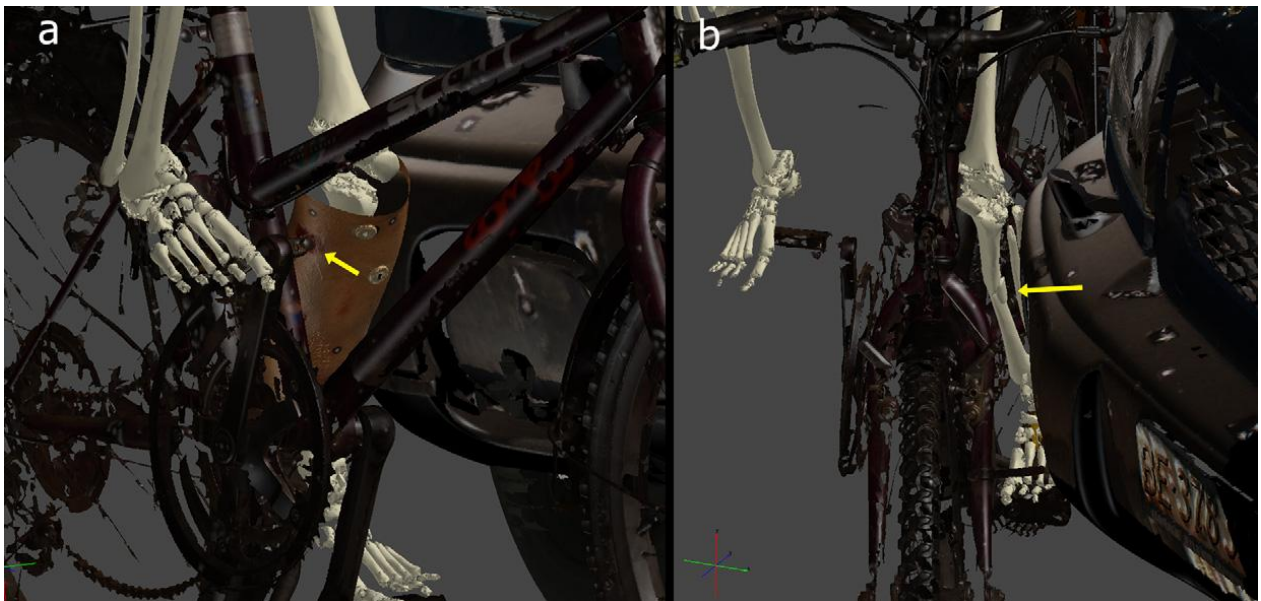


Fig. 7. Correlation of vehicle parts and impact injuries of the left lower leg (case 1). (a) Correlation of an outward injury with a screw of the bicycle frame (yellow arrow). (b) Correlation of the wedge fracture of the left tibia with the bumper of the car.

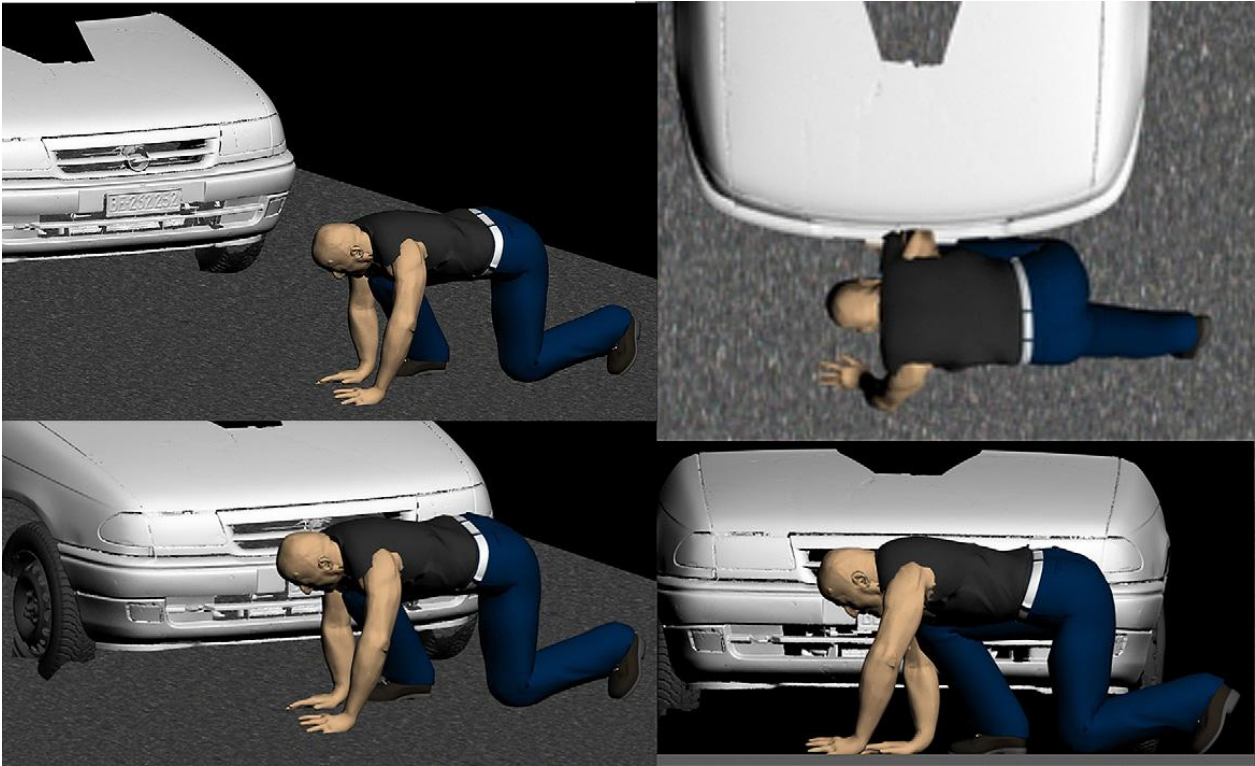


Fig. 10. Considering all injuries and traces the impact situation could be reconstructed: the accident victim in kneeling position (case 2).

Bijlage 9

Bron: Aghayev Emin, Staub Lukas, Dirnhofer Richard, Ambrose Tony, Jackowski Christian, Yen Kathrin, Bolliger Stephan, Christe Andreas, Roeder Christoph, Aebi Max, Thali Michael J. Virtopsy - The concept of a centralized database in forensic medicine for analysis and comparison of radiological and autopsy data. *J For Leg Med.* 2008, 15: 135-140

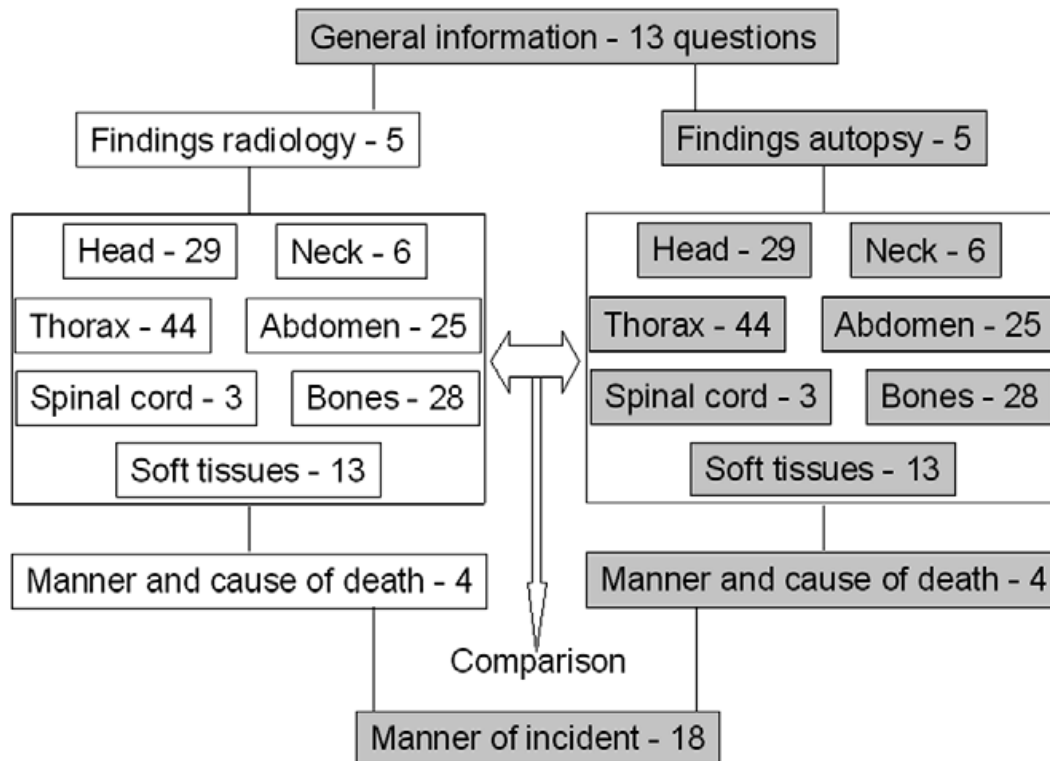


Fig. 2. The diagram shows the subforms of the Virtopsy database including the number of the question and who is responsible for their completion. The white marked subforms should be filled in by the forensic radiologist and the grey by the forensic pathologist. The parallel filling in of the same questions by the forensic radiologist and pathologist, except for the general case information and the questions about manner of incident that are to be answered by the forensic pathologist, allows for comparisons of the cross-sectional radiology and the autopsy data, to see how many and which findings are detectable using which method.

LITERATUURSTUDIE ONDERZOEK CT DRENKELINGEN
PATHOLOGISCHE BEVINDINGEN BIJ VERDRINKING
&
RADIOLOGISCHE BEVINDINGEN BIJ ASPIRATIE, LONGOEDEEM
EN VERDRINKING

Pauwels Stephanie
Stamnummer 00604880
2e Master Geneeskunde

Prof. Dr. K. Verstraete
Prof. Dr. M. Piette

Inhoud

Pathologische bevindingen bij verdrinking.....	Z
Inleiding.....	Z
Uitwendig onderzoek.....	AA
Huid.....	AA
Hoofd en hals.....	BB
Inwendig onderzoek.....	CC
Hoofd en hals.....	CC
Thorax.....	DD
Abdomen.....	FF
Bloedonderzoek.....	FF
Decompositie.....	HH
Bepaling van de waterlichtijd.....	II
Diatomeeënonderzoek.....	II
Bepaling mogelijke doodsoorzaak.....	KK
Accidentele verdrinking.....	KK
Suicidale verdrinking.....	KK
Verdrinking door moord.....	KK
Verdrinking in bad.....	LL
Verplaatsing van het lijk.....	MM
Radiologische bevindingen bij oedeem en aspiratie.....	MM
Hydrostatisch pulmonair oedeem.....	MM
Aspiratie van zand.....	NN
Radiologische bevindingen bij verdrinking.....	OO
Bijna-verdrinking.....	OO
Verdrinking (CT tov. autopsie).....	OO
Paranasale sinussen en mastoid.....	OO
Luchtwegen.....	PP
Hart en bloedvaten.....	QQ
Maag en duodenum.....	QQ
Bijna-verdrinking tov. verdrinking.....	RR
(Cerebrale) Arteriële gasembolie bij duikongevallen.....	SS
Bevindingen Virtopsy© Project.....	TT
Bibliografie.....	UU

Pathologische bevindingen bij verdrinking

Inleiding

Verdrinking wordt gedefinieerd als de situatie waarin een individu een verslechtering in zijn ademhalingsfunctie heeft als gevolg van onderdompeling in een vloeibaar medium. (1) Het bestaat uit verschillende fases. Eerst houdt het slachtoffer zijn adem in. Nadien aspireert hij/zij water bij het naar adem snakken onder water. Hierdoor ontstaat er cerebrale hypoxie wat leidt tot verlies van bewustzijn. Tegelijk zorgt deze hypoxie ook voor hersenschade en uiteindelijk de dood. (2) Verdrinking behoort tot “snelle anoxie”. De dood treedt op door een tekort aan zuurstofvorming in de mitochondriale oxidatieve fosforylatie. Dit zorgt voor cerebrale anoxie, dat op zijn beurt leidt naar ventriculaire asystolie of fibrillatie. Specifiek bij verdrinking ontstaat deze anoxie door obstructie van de luchtwegen door inhalatie van water. De hemodilutie die ontstaat als gevolg hiervan zorgt voor biochemische veranderingen, waardoor verdrinking gepaard gaat met acute elektrolytstoornissen. Dit is echter controversieel. Vele post mortem bevindingen worden ook bij andere doodsoorzaken gevonden, waar anoxie een rol speelt. Bij snelle anoxie kan men vaak pathologische bevindingen aantonen behorende tot volgende groepen: locale fysische verwondingen, laesies gerelateerd aan verhoogde veneuze druk en tekens van snelle anoxische dood (soft signs of asphyxia). (3)

Autopsie is essentieel bij vermoeden van verdrinking. Men moet echter rekening houden met het feit dat er verschillende andere onderzoeken mogelijk en/of nodig kunnen zijn. Zo zijn er de biochemische, histologische en toxicologische analyses, de diatomeeëntest en de bevindingen op plaats delict. De diagnose van verdrinking kan dus in veel gevallen niet gesteld worden aan de hand van autopsie alleen. (2) De schuimprop in de mond en luchtwegen staat bekend als het meest pathognomonische teken voor verdrinking maar komt niet vaak voor. Verder zijn zware gezwollen longen met veel oedeem een significant teken voor de diagnose. (1)

Er zijn geen specifieke laesies gevonden in het hart die passen bij verdrinking. (3) Cardiovasculaire ziekten komen vaker tot uiting door de fysieke activiteit bij zwemmen of de inspanning om niet te verdrinken. De mogelijke myocardiale insufficiëntie of aritmie die hieruit ontstaat, kan dan leiden tot de dood door het cardiale arrest zelf of door de onmogelijkheid om nog boven water te blijven. Zo wordt geopperd dat zwemmen na een zware maaltijd gevaarlijk kon zijn. (1) (4) Soms is er sprake van een reflexe cardiale blok. Deze komt voor na een sterke stimulatie van de sensitieve zenuwuiteinden. Hierdoor ontstaat een plotse overactiviteit van het parasympatisch zenuwstelsel met een bradycardie en cardiale blok als gevolg. De zenuwuiteinden kunnen op twee manieren gestimuleerd worden. Enerzijds kan het onderdompelen in koud water de cutane zenuwuiteinden stimuleren. Alcohol werkt dit in de hand door vasodilatatie van de bloedvoorziening in de huid. Anderzijds kan koud water dat in de pharynx, larynx of

het oor terechtkomt, de zenuwuiteinden in de mucosa stimuleren. (2) (4) Er is echter geen bewijs te vinden van deze reflexe cardiale blok bij autopsie. (2) (4) (5) Papadodima toonde in een studie aan dat ongeveer de helft van de drenkelingen voorafbestaande cardiovasculaire problematiek vertoonden. Dit doet veronderstellen dat dit een grote risicofactor is voor verdrinking. Enerzijds bekijkt men zwemmen als positief ter preventie van een myocardinfarct en cardiale problematiek. Anderzijds leidt zwemmen tot een verhoogde hydrostatische en thermische load. Onderdompeling op zich brengt hemodynamische veranderingen en electrolytenshifts teweeg in het lichaam, zoals veranderingen in bloeddruk, hartritme, circulerend bloedvolume, en meer. Ook de temperatuur van het water kan cardiale problemen uitlokken, vooral koud water. (1)

Laryngeaal spasme, door contact met koud water, zou een oorzaak kunnen zijn van dood in het water zonder dat er eigenlijk verdrinking plaatsvindt. Deze moet dan wel minutenlang aanhouden om een dodelijke hypoxie te bewerkstelligen. Al die tijd moet de larynx gesloten blijven, waardoor er ook geen water binnen kan dringen. (4)

Uitwendig onderzoek

Huid

Bij verlengde onderdompeling in water treedt het fenomeen “washerwoman skin” op. Dit is het verbleken en rimpelen van de huid. In vroege stadia treedt deze maceratie vooral op ter hoogte van handen en voeten, en de zones die niet bedekt zijn. Later treedt dit ook op andere plaatsen op. (2) (4) (3) Maceratie begint binnen minuten in warm water en na een viertal uur in koud water. Na enkele dagen in warm of enkele weken in koud water kan de keratine aan handen en voeten loskomen en het aspect “degloving” vertonen. (2) (4) Ook nagels en haren komen los mettertijd. (2)

Trauma in het water komt vaak voor. Dit is dan meestal het gevolg van schrapen tegen stenen, een pier en dergelijke. De plaatsen waarbij men dit het vaakst ziet zijn het hoofd, de handen en de knieën, aangezien zij meestal naar beneden hangen in het water. Ook boten kunnen traumatische schade aanrichten. Dit komt vaker voor in commerciële wateren. Het is mogelijk dat een schroef een lichaamsdeel losscheurt. Typische laesies zijn parallelle wonden met een snijdend karakter. Meestal vindt men deze op het hoofd of de rug. (4) Ook putrefactie kan leiden tot verlies van ledematen. Deze afgerukte/verloren lichaamsdelen kunnen al drijvend teruggevonden worden, of bij dregging. (3)

Het uitzicht van wonden kan veranderen door het wegwassen van bloed door het water. (2) (3) Hierdoor wordt het moeilijk om te bewijzen of ze ante- of post mortem ontstaan zijn. Bij een ante mortem wonde is er bij dissectie subcutane hemorrhagie te vinden, bij een post mortem wonde niet. (3) Het lijk kan groene of zwarte plekken vertonen onder de huid, vooral ter hoogte van de hoofdhuid. Dit kan wijzen op onderhuids bloed of autolytische veranderingen. (2) (4) Kreeftachtigen die in het water leven kunnen

typische bijt- en andere wondjes veroorzaken, vooral in het gezicht. Ook vleesetende dieren kunnen het lijk beschadigen. Deze trauma's moeten onderscheiden worden van ante mortem wonden. (4) (3)

Cutis anserina of 'goose flesh' wordt vaak gezien bij verdrinking. Dit fenomeen ontstaat door het samentrekken van de erector pilae aan de haarfollikels en geeft dan een algemeen kippenvelaspect aan de huid. Dit kan echter optreden bij gelijk welke doodsoorzaak. Men stelt dat rigor mortis cutis anserina kan veroorzaken door het algemeen samentrekken van spieren. Dit wordt betwist omdat deze verkorting niet zo groot is. (2) (4) Het werd vroeger aanzien als een diagnostisch middel bij verdrinking. Daar is men nu echter van afgestapt. (2) (4) (3)

Lijkvlekken, cyanose van het lijk, helrode dodenvlekken en goose flesh komen voor, maar zijn volkomen onspecifiek. (6)

Hoofd en hals

Een klassiek, niet-specifiek teken bij verdrinking is witte schuimprop die uit de neus of mond komt. (3) (6) (5) De prop is transiënt van aard en kan alleen teruggevonden worden bij vers verdrongen lijken. (5) Hij ontstaat vanuit de kleinere luchtwegen en verplaatst zich naar de trachea, hoofdbronchi en uiteindelijk naar de farynx en mondholte. Deze prop bestaat uit oedemateus vocht van de longen, meer bepaald proteïnerijk exsudaat, surfactant en water van de verdrinkingsplaats. De kleur kan rood of rozig zijn door bijmenging met bloed uit de longen. Deze prop kan echter ook teruggevonden worden bij linkerhartfalen. (2) (4) In dat geval is hij meestal echter kleiner dan bij verdrinking. (2) Ook bij een epileptische aanval of vergiftiging kan schuim uit de mond voorkomen. (6) Wanneer de prop verdwenen is enkele uren na de vondst van het lijk, kan het vocht vaak toch nog teruggevonden worden in de grote en kleinere luchtwegen. (2)

Roze of rode verkleuring van de tanden treedt vaak op na 1 à 2 weken decompositie in het water. Deze bevinding gaat voornamelijk samen met verdrinking, maar is ook teruggevonden bij onder andere ophanging en koolmonoxidevergiftiging. Waarschijnlijk zijn deze roze tanden het gevolg van decompositie in het water, waarbij er congestie optreedt van de tandpulpa. (3) Vaak is het gezicht niet meer herkenbaar. Dit is een gevolg van de putrefactie, die aan het hoofd sneller optreedt omdat het meestal naar beneden in het water hangt. (4)

Hoofd en hals

De morfologische bevindingen in de hersenen na anoxie zijn afhankelijk van de duur van het zuurstoftekort. Wanneer dit zeer beperkt is, zoals door snelle anoxie bij verdrinking, zijn er vaak geen afwijkingen te vinden. Slechts indien er sprake is van een interval van overleving, bijvoorbeeld reanimatie, kan men neuronale necrose waarnemen. Deze necrose situeert zich vooral in zuurstofgevoelige gebieden, zoals de cerebrale cortex, de pyramidale neuronen en de grijze kernen, waarbij de neuronen hyperchromasie en pyknose vertonen. Het perikaryon is verkleind en eosinofiel. (3)

Streepvormige, meestal dubbelzijdige, subfaciale of intramusculaire bloedingen in de hals zouden een aanwijzing zijn voor verdrinking, wanneer uitwendig geweld uit te sluiten valt. Deze bloedingen kunnen ook voorkomen ter hoogte van de M. Pectoralis. (6) Zij zouden verklaard worden door hevige halsbewegingen tijdens het verdrinken, agonale convulsies of hypercontractie en overextensie van skeletale spieren van de nek, het bovenlichaam en bovenste extremiteiten. Dit is echter controversieel. In afwezigheid van trauma kunnen deze bloedingen verklaard worden door hypostase of een extensie. Ook het Prinsloo en Gordon artefact, post mortem hemorrhagie op de posterieure zijde van de oesofagus, is een mogelijke artefact. (5)

Druk op de nek, door bijvoorbeeld wurging waarna het lijk gedumpt wordt in het water, kan typische verschijnselen veroorzaken. We spreken dan vooral van superficiële abrasies en of contusies van het ventrale gedeelte van de hals, wat vooral sterk aanwezig is wanneer kledingstukken van het slachtoffer tussen huid en handen geperst werden. Vingernagels kunnen curvilinaire abrasies geven, druk van vingers zorgt voor punctuate contusies. In de zachte weefsels van de hals kan hemorrhagie optreden. Zo vindt men dit bijvoorbeeld door ruptuur van de laryngofaryngeale vasculaire plexus, maar ook als gevolg van indirecte mechanismen ter hoogte van de kaken, oogleden, conjunctivae en de serosale oppervlakten van longen en hart. Door de druk op de nek kunnen fractures ontstaan van het hyoïd en de larynx. Dit is vooral te vinden aan de cornua superior van het thyroïd kraakbeen. Zij zijn ante mortem ontstaan wanneer men hemorrhagie kan aantonen. Wanneer de larynx nog niet gecalcificeerd is buigt het kraakbeen mee, wat zorgt voor intracartilagineuze laryngeale hemorrhagie. De luchtbevattende cellen van het mastoïd en de pars petrosa (temporaalbeen) kunnen hemorrhagie vertonen. De sfenoidale sinussen bevatten vaak water, ook al is er elders in de luchtwegen geen water te vinden. (3) Bij vermoeden van strangulatie kan een röntgenfoto van het skelet van de larynx genomen worden. In extenso kan men van het hele skelet een RX-foto nemen op zoek naar breuken en andere afwijkingen. (7)

De fysiologische veranderingen bij verdrinking gebeuren onder andere ter hoogte van de longen. Het is mogelijk dat grote hoeveelheden vocht geïnhaleerd worden zodat er vocht aanwezig is in de luchtwegen. Dit vocht kan zand en dergelijke bevatten. De luchtwegobstructie zorgt ervoor dat (bepaalde delen van) het longparenchym niet geventileerd worden. Dit leidt tot een ventilatie/perfusie mismatch. (3) De aanwezigheid van vreemd materiaal in de hoge luchtwegen is echter geen bewijs van in vivo aspiratie. (2) Door de acute insufficiëntie kan men een uitgezette rechter boezem en kamer vinden. Zelden kan men in het linker hart een luchtembolie aantreffen. (6)

Pulmonair oedeem komt zeer vaak voor bij verdrinking, maar is niet-specifiek omdat het ook door andere oorzaken verklaard kan worden. Wanneer de andere bevindingen echter correleren met de diagnose van verdrinking wordt deze factor een belangrijke indicator. (3) Het oedeemvocht blokkeert de bronchi waardoor de longen niet kunnen collaberen na het intreden van de dood. Zij blijven in inspiratoire positie. (2) (4) Door toenemende ontbinding vallen de longen uiteindelijk toch samen. Zij worden dan volledig atelectatisch en onkarakteristiek. (6) Met microscopie kan emphysema en oedema aquosum gevonden worden. Bij emphysema aquosum is er sprake van expansie van de alveolaire ruimten. Bij oedema aquosum bevindt er zich proteïnerijk vocht in de alveoli. (3) Het emphysema aquosum wordt gekarakteriseerd door bijna lege en gedilateerde alveoli, wat het gevolg is van een wash-out effect van het verdrinkingsmedium. Dit zorgt er voor dat de macrofagen gedeeltelijk verwijderd worden van de alveolen. Men vindt deze macrofagen dan ook in de schuimprop terug. Een telling van de macrofagen geeft geen verdere informatie voor de verdrinkingsdiagnose. (8) Algemeen vinden we dus een atypische, oedemateuze hyperemische long. (6) Ook deze bevindingen zijn niet specifiek, maar krijgen meer waarde in de passende context. (3) In de pleurale holte kan helder vocht aanwezig zijn als gevolg van diffusie van het geïnhaleerde water uit de longen. Men moet echter in gedachten houden dat bij het proces van decompositie ook vocht in de caviteiten van de thorax kan terechtkomen. (3) Op de pleura kunnen vlekken van Paltauf aanwezig zijn. Dit zijn plekken die ontstaan door hemolyse in bloedingen, welke voorkomen bij het stikken. (6)

Klassiek vertonen de longen hyperinflatie. Hierdoor ontstaan vaak impressies op de longen door het drukken tegen de ribben. Het is mogelijk dat de mediale zijden van de longen mekaar raken ter hoogte van het sternum (kissing lungs) en het mediastinum anterior vernauwen. (2) (4) (3) (6) Meestal wegen de longen bij verdrinking ruwweg tussen 500 en 1000 gram, wat meer is dan gewone longen welke gemiddeld ongeveer 400 à 500 gram wegen. (4) (3) Hadley et al. besluiten uit hun studie dat een gestegen long- en niergewicht het gevolg is van asfyxie en aspiratie van water tijdens verdrinking. Het gestegen lever- en miltgewicht zou enkel afhangen van asfyxie. De vaak opgemerkte kleine anemische milt is volgens hun bevindingen een post mortem fenomeen en niet pathofysiologisch te linken aan verdrinking.

Lever, hersenen en hart ondergingen volgens Hadley en Fowler geen veranderingen als gevolg van verdrinking. (9) De longen zijn bij verdrinking dus in vele gevallen zwaarder. Het gewicht op zich is echter niet voldoende om de diagnose van verdrinking te stellen. (3) Ook Hadley en Fowler stellen dat een oedemateuze long de diagnose tussen verdrinking en asfyxie niet kan hard maken. (9)

Azparren et al. stellen de long-lichaam gewichtsratio voor als indicator voor. Een ratio van meer dan 19,5 gram per kilogram zou wijzen op verdrinkingsdood, lagere ratio's zouden meer onderzoek vragen om de diagnose te bevestigen. (10) Zhu et al. trachten aan de hand van het longgewicht en de pleurale effusie een verschil te maken tussen zoet en zout water verdrinking. Lijken uit zout water hadden een significante daling in totale waarde voor longgewicht en hoeveelheid pleurale effusie na drie dagen. Zij stellen dat dit het gevolg is van het lekken van pleurale effusie in de thoraxholte door het osmotische effect na onderdompeling in een zout medium. De waarden zijn echter sterk afhankelijk van geslacht en leeftijd. (11) Nishitani et al. probeerden aan de hand van de drowning index (de ratio van longgewicht en pleurale effusie ten opzichte van het gewicht van de milt) een onderscheid te maken tussen verdrinking en andere vormen van asfyxie zoals acute cardiale dood. Zij stellen dat deze index, mits verder onderzoek, nuttig is om de verdrinkingsdiagnose te stellen ten opzichte van asfyxie en cardiale dood. De index wordt beïnvloed door pulmonair oedeem en een droge milt. (12)

Zeer recentelijk werd door een Japanse onderzoeksgroep getracht om via expressie van aquaporines een onderscheid te maken tussen zoet en zout water verdrinking. Hayashi et al. onderzochten de intrapulmonaire expressie van aquaporine 5. Dit komt op verschillende plaatsen in het lichaam voor, zoals onder andere in het corneaal epitheel en de apicale membraan van type 1 alveolaire epitheelcellen. Zij stellen dat hypotoon water door AQP5 wordt getransporteerd bij zoet water verdrinking, afhankelijk van de osmolariteit. Zij leiden hieruit af dat AQP5 expressie door influx van hypotoon water onderdrukt wordt in type 1 alveolaire epitheliale cellen. Dit heeft als doel hemodilutie tegen te gaan als overlevingsreactie bij verdrinking in zoet water. Zij vonden tijdens hun onderzoek dat de ratio van AQP5 ten opzichte van β -actine in zoet water verdrinking significant onderdrukt is ten opzichte van de ratio bij zout water verdrinking en bij andere doodsoorzaken. Zij besluiten hieruit dat aquaporine 5 een marker kan zijn voor differentiatie tussen zoet en zout water verdrinking. (13) Ook intrarenale AQP2 expressie zou het verschil duidelijk kunnen maken. An et al. onderzochten de aquaporine-expressie in de hersenen. Aquaporine 4 komt voor op astrocyten en ependymale en piaale oppervlakten. De expressie van AQP-4 positieve astrocyten was significant hoger in zoet water verdrinking ten opzichte van zout water en controlegroepen. Men denkt dat deze stijging te wijten is aan een triggersysteem als gevolg van influx van hypotoon water. De opregulatie van AQP-4 moet hemodilutie tegengaan. Verder onderzoek is nodig. (14)

De aanwezigheid van water in de luchtwegen, zwaardere longen en pleurale effusie komen voor bij verdrinking, maar deze tekenen zijn niet specifiek aangezien zij ook optreden bij decompositie. (3) (6)

Longemfyseem, oedema aquosum, ribtekening op de longen, vlekken van Paltauf, schuimprop in de trachea, verhoogd longgewicht en pleurale effusies zijn bruikbare bevindingen om de diagnose van verdrinking te benaderen. (5)

Abdomen

De maag kan (grote hoeveelheden) vocht bevatten door het inslikken van water tijdens de verdrinkingsfase. (4) (3) (5) Dit is het teken van Wydler. (5) Ook vreemd materiaal, zoals zand en wier, kunnen in de maag aangetroffen worden. Wat in de maag terecht kan komen, hangt vooral af van de tonus van de oesofagus en de lage oesofagale sfincter. (4) Wanneer er scheuren in de oesofagale mucosa gevonden worden spreekt men van het syndroom van Mallory-Weiss. (5) De aanwezigheid van vreemd materiaal in de maag is echter geen bewijs van in vivo aspiratie. (2) Andere bronnen spreken dit tegen. Zij vinden dat dit materiaal niet passief in het maag-darmkanaal kan terechtkomen, door bijvoorbeeld de druk van het water bij onderdompeling, maar dat dit vreemd materiaal actief ingeslikt is. (6)

De nieren zouden als gevolg van asfyxie en wateraspiratie een hoger gewicht krijgen, net als de longen. De milt en lever zouden in gewicht afnemen door de asfyxie. (5) Hadley et al. stellen echter dat lever en milt toenemen in gewicht, maar dat dit niet het directe gevolg is van verdrinking (wel van asfyxie) op zich en dus niet telt als diagnostisch criterium. (9) De milt kan in lichte mate verkleind zijn bij verdrinking. Dit is echter niet steeds het geval. (4) (3) Stress, hypoxie, alcohol en onderkoeling werden opgeworpen als mogelijke verklaringen voor het verkleinen. (4) Het kan tevens een post mortem fenomeen zijn. (5) Hadley en Fowler stelden in 2003 dat een kleine anemische milt een post mortem fenomeen is. (9)

Bloedonderzoek

De fysiologische veranderingen bij verdrinking gebeuren onder andere in het bloed. Het belangrijkste is de arteriële hypoxemie, die onmiddellijk optreedt wanneer de luchtwegen gevuld zijn met water. Respiratoire acidose volgt hierop en wanneer er sprake is van een overlevingsinterval ontstaat er ook metabole acidose. (3) Het ingeademde vocht komt terecht in de alveoli. Door de zeer permeabele barrière naar de capillairen komt dit in het bloed terecht, waar snel verschuivingen van het bloedvolume optreden. (3) In zoet water stijgt het systemische bloedvolume door het hypotone vocht dat in de bloedbaan terechtkomt. Hypervolemie treedt op. Hyponatriëmie en hypochloremie zijn de elektrolytstoornissen die bij dit type optreden. Dit is echter niet dodelijk op zich. (3) (6) De hemodilutie zorgt voor relatieve anemie en myocardiale hypoxie. De cardiale capaciteit is niet groot genoeg om de hypervolemie aan te kunnen. (4) In zout water daalt het systemische bloedvolume door het hypertone karakter. Er treedt hemoconcentratie en hypovolemie op. (6) Dit leidt op zijn beurt naar verhoogde osmolaliteit en viscositeit

van het bloed, wat bijdraagt tot de ventilatie-perfusie mismatch door gedaalde perfusie van de long. Hierbij treedt hypernatriëmie en hypokaliëmie op. Ook dit is op zich niet dodelijk. (3) Dit mechanisme tast de hartfunctie minder sterk aan, waardoor de overleving langer is. Zo duurt een verdrinking in zoet water gemiddeld vier à vijf minuten en in zout water acht à twaalf minuten. (4) In het geval van bijna-verdrinking worden normaal geen klinisch significante elektrolytstoornissen gevonden, zowel bij zoet als zout water. Een aspiratie van meer dan 11 ml/kg zou moeten plaatsvinden om het bloedvolume te laten veranderen. Meer dan 22 ml/kg zou moeten geaspireerd worden om elektrolytstoornissen te bewerkstelligen. (15)

Recent werd bewezen dat er een relevante stijging is in serum chloor, magnesium en calcium bij zout water verdrinking. Problematisch is echter het feit dat deze ioneneconcentraties snel wijzigen post mortem. (16) Maeda et al. stellen dat de links-rechts ratio van cardiaal bloed voor stikstof lager is bij verdrinking. Natrium en chloor in serum en pericardiaal vocht is licht gestegen. Natrium, chloor, calcium en magnesium zijn hoger bij zout water verdrinking. De correlatie tussen deze markers in links cardiaal serum en het gewicht van de longen is positief voor natrium, chloor en magnesium bij verdrinking in zout water en brak water en voor calcium bij zoet water. (17) Usumoto et al. onderzochten kortelings de electrolyten bij pleurale effusie en merkten dat natrium- en chloorionen een significant verschil hebben tussen zee- en zoet water verdrinking. Zij stellen dat een concentratie van natrium- en chloorionen in pleurale effusie van respectievelijk meer dan 170 mEq/L en 125 mEq/L een sterke indicatie is voor zout water verdrinking. De concentraties voor zoet water waren telkens lager dan 100 mEq/L. Verder zouden de concentraties van kalium en totaal proteïne gebruikt kunnen worden om een ruwe schattig te maken van het post mortem interval. (18)

Een normale concentratie voor strontium in het bloed is bij levenden is $11.4 \pm 0.83 \mu\text{g/L}$. (19) Bij verdrinking in zout water zou de strontiumconcentratie tussen het bloed van het linker- en rechterhart steeds meer dan $75 \mu\text{g/L}$ verschillen. (4) (5) (20) (16) In het bloed van een drenkeling en in het water zijn de waarden voor strontium hoger dan bij levende personen. Putrefactie, post mortem trauma en schade aan het lijk door fauna en flora kan deze bloedwaarden echter verhogen, doordat er strontium uit het water terecht komt in het bloed. (2) (21) Er is dus een positieve correlatie tussen het strontiumgehalte in het perifere bloed en post mortem interval. Door de hoge concentraties in zout water is strontium een goede marker voor dit type verdrinking. De concentraties in zoet water zijn echter veel lager en meer variabel. (21) Zo zijn de waarden voor zoet water in België gemiddeld $362 \mu\text{g/L}$. De Noordzee heeft een strontiumconcentratie van $6677 \mu\text{g/L}$. (19) De betrouwbaarheid van strontium als marker wordt aldus betwist in het geval van zoet water. De waarden variëren en overlappen sterk tussen de lichaamsdelen wanneer men links ten opzichte van rechts bekijkt, en tussen drenkelingen en niet drenkelingen. (20) In geval van onderdompeling van dumping schijnen de strontiumconcentraties normaal te blijven. (21)

Het verschil in ijzerconcentratie tussen linker- en rechterventrikel is significant hoger bij zoet water drenkelingen dan in controles. Het verschil was respectievelijk 67,7 $\mu\text{mol/L}$ en 1,36 $\mu\text{mol/L}$. Bij vergevorderde ontbinding is deze marker echter onbetrouwbaar, omdat er niet genoeg bloed in het hart aanwezig is om te testen. Binnen een kort interval na verdrinking lijkt ijzer een goede biochemische marker om verdrinking aan te tonen. (20) (16)

Lucci et al. deden recent onderzoek naar de mogelijkheid om een microbiologische marker te ontwikkelen. Zij stellen faecale coliformi en faecale streptococci voor. Het aantonen van een micro-organisme uit het water in de weefsels en het bloed van een drenkeling is voldoende om te bewijzen dat het hart klopte wanneer het slachtoffer in het water terecht kwam, en deze organismen na inhalatie en verspreiding van de longen naar de bloedbaan heeft rondgepompt gedurende het verdrinkingsproces. De studiegroep was echter te klein om belangrijke conclusies te kunnen trekken. Het onderzoek is echter veelbelovend en verdere stappen op dit elan zijn zeker aangewezen. (16) Aoyagi et al. onderzoeken de mogelijkheid om *Aeromonas sobria*, één van de meest frequente bacteriën in zoet water, met een PCR methode aan te tonen bij (zoet water) verdrinking. Zij stellen dat deze methode hoogstwaarschijnlijk beter is dan de detectie van diatomeën met de acid digestion method omdat vele diatomeën vernield worden tijdens deze procedure als gevolg van sterk zuur en hitte. Verder onderzoek is nodig, ook drenkelingen uit zout water dienen onderzocht te worden. Zij halen tevens aan om voor zoet water ook *Aeromonas hydrophila* en *Aeromonas caviae* toe te voegen aan het onderzoek om de bevindingen meer specifiek en sensitief te maken. (22)

Bij een aantal onverklaarde verdrinkingen werd door de Mayo Foundation een moleculaire autopsie gedaan, op zoek naar genetische afwijkingen die aan de basis kunnen liggen van de verdrinking. Zij vonden een RyR2 mutatie die verantwoordelijk is voor een catecholaminerge polymorfe ventriculaire tachycardie. Zij stellen dat een epidemiologisch onderzoek nodig is om te onderzoeken of deze mutatie een mogelijk mechanisme voor verdrinking is. Ook het mogelijks belang van familiaal lang QT-syndroom wordt aangehaald. (23) Het potentieel belang van genetisch bepaalde channelopathiën wordt ook door andere auteurs aangehaald. (1)

Decompositie

De decompositie van een waterlijk hangt af van taphonomische factoren. Hieronder verstaat men de eigenschappen van het lijk zelf en zijn omgevingsfactoren zoals watertemperatuur, waterdiepte, de graad van onderdompeling, organismen in het water, getijden, stenen in het water en dergelijke. Het ontbinden is een dynamisch proces dat geen vaste stappen volgt. De decompositie gaat het snelst in warm ondiep water en het traagst in diep koud water, waarbij na enkele jaren slecht een minimum aan ontbinding mogelijk kan zijn. (3)

Het is moeilijk om het ontbindingsproces in te delen in fases. Gemiddeld start het proces met de ontkleuring van de huid. Dit gebeurt binnen de twee dagen. Hierna heeft de vroege decompositie plaats, waarbij onder andere vroege putrefactie van de organen plaatsvindt. Na één week tot twee maand is er de gevorderde decompositie, waarbij de adipocere formatie begint. Na maanden tot jaren blijft enkel nog het skelet over, omringd door adipocere. Adipocere is een vrij harde, grijsachtige substantie die ontstaat in het vetweefsel door hydrolyse en hydrogenatie van vetzuren. Deze vorming duurt meestal om en bij de twee maand, maar is variabel. De adipocere beschermt het skelet en eventuele organen, wat goed van pas komt bij de diatomeëentest. (3) Hoe sterker uitgesproken de putrefactie is, hoe minder kans er bestaat om positieve tekenen van verdrinking te vinden. (2) (4)

Tijdens de ontbinding is er sprake van gasvorming, wat zorgt voor het drijven van een waterlijk. Wanneer dit plaatsvindt, is zeer variabel. Meestal hangt het gezicht naar beneden in het water, door de densiteit van het hoofd en de vroege formatie van gas in de thorax en het abdomen. Door de stroming in bepaalde wateren kan een lijk echter constant omrollen. (4)

De ontdekking van lijken in water gebeurt meestal later dan die op het land. Hierdoor zijn zij vaker in verdere staat van ontbinding, ook al heeft de decompositie trager plaats. Water beschermt het lijk tegen insecten en kleine vleesetende dieren. De micro-organismen die voor het grootste deel verantwoordelijk zijn voor de ontbinding zijn echter die uit de gastro-intestinale tractus en de luchtwegen. (4)

Bepaling van de waterligtijd

Wanneer er geen maceratie te zien is, ligt het lijk waarschijnlijk minder dan een paar uur in het water. Indien er wel maceratie aanwezig is, ligt het waarschijnlijk tussen een halve dag en drie dagen in het water. Tussen vier en tien dagen is er sprake van vroege ontbinding, meestal eerst ter hoogte van het hoofd, het abdomen en de heupen. Na twee tot vier weken waterligtijd is er sprake van ‘bloating’ van het gezicht en het abdomen met “marbling” van de venen. De epidermis van handen en voeten komt los, evenals de hoofdhuid. Wanneer er sprake is van grote stukken huid die loskomen, evenals spieren waarbij het skelet zichtbaar wordt, en partiële liquefactie, kan men veronderstellen dat het lijk reeds één tot twee maanden in het water ligt. Deze indeling is echter niet steeds toe te passen, verschillende factoren kunnen de ontbinding sneller of trager laten verlopen. (2) (4)

Diatomeeënonderzoek

Diatomeeën zijn unicellulaire waterplanten (diatomacea), behorende tot het phytoplankton. Er bestaan verschillende soorten, dewelke morfologisch onderscheiden kunnen worden door hun exoskelet (frustule) bestaande uit silica. Zij komen voor in natuurlijk ontstane wateren (zee, meer, rivier, poel en dergelijke.), maar kunnen door contaminatie ook aanwezig zijn in gefilterd water zoals kraantjeswater.

Diatomeeënpopulaties worden constant beïnvloed door talrijke factoren zoals bijvoorbeeld temperatuur, zuurtegraad en seizoen. (3)

Wanneer een persoon verdrinkt ademt hij water in. Dit komt terecht in de alveoli waar het de alveolocapillaire membraan passeert en in de pulmonaire veneuze circulatie terechtkomt. Wanneer het water diatomeeën bevat, bereiken deze nu via het bloed het linker hart. Van hieruit emboliseren zij organen en weefsels. Ook in het femorale beenmerg worden dan diatomeeën teruggevonden. Aangezien het femorale beenmerg zich in een afgesloten ruimte bevindt, vrij van contaminatie, wordt de aanwezigheid van diatomeeën aldaar aanzien als een bewijs van ante mortem inhalatie van water. Dit betekent dat deze persoon ademde wanneer hij terecht kwam in het water, en dat verdrinking de doodsoorzaak of een bijdragende factor tot de dood was. Wanneer de diatomeeën in het beenmerg overeenstemmen met deze uit het water waarin het lijk gevonden werd, is dit een bewijs dat de verdrinking daar plaatsvond. (4) (3)

Wereldwijd bestaat er echter discussie over de (medicolegale) geldigheid van de test. Zo is er sprake dat diatomeeën ook aangetoond kunnen worden bij personen die niet verdrongen zijn. Dit leidt tot het feit dat de test vooral in Europa, Engeland, Japan en Zuid-Amerika wordt toegepast en veel minder in Noord-Amerika. (3) Een belangrijke bedenking bij de test is de volgende: er is geen bewijs dat diatomeeën niet via de gastro-intestinale tractus in het bloed terecht zouden kunnen komen. Bepaalde voedingsmiddelen zoals schaaldieren bevatten diatomeeën. (2) (4) Tandpasta kan ook diatomeeën bevatten. (2) De test wordt echter nog steeds aanvaard als de “gouden standaard”. (5)

Indicaties voor deze test zijn gevallen waarbij er een vermoeden van verdrinking bestaat, of wanneer er helemaal geen (anatomische) bewijzen gevonden kunnen worden bij het post mortem onderzoek die de dood kunnen verklaren. Men moet zich namelijk ten allen tijde bewust zijn van het feit dat verdrinking de doodsoorzaak kan zijn, ook al is het lichaam niet in het water ontdekt. Zo is er soms sprake van het drogen en verplaatsen van het lichaam, meestal naar een bed, bij accidentele of suïcidale verdrinking. Bij moord wordt het lijk vaak uit het water gehaald en verborgen. Wanneer men het lichaam ontdekt is het dan reeds aan het ontbinden, geskeletoniseerd of post mortem verbrand. In de praktijk zal men routinegewijs alle lichamen of lichaamsdelen die gevonden worden in water onderwerpen aan deze test. Contra-indicaties zijn het gebruik van een femur met een fractuur of gevallen waarbij het lichaam lange tijd ondergedompeld is op grote diepte. Bij verdrinking in gefilterd water, zoals badwater, is de test meestal negatief. (3)

Bepaling mogelijke doodsoorzaak

Accidentele verdrinking

Accidentele verdrinking tijdens de zomermaanden komt het vaakst voor. Meestal is er sprake van een associatie met watergerelateerde ontspanning, een complicatie van natuurlijke ziekte (bijvoorbeeld atherosclerose) of alcohol- of drugsintoxicatie. Hypothermie kan een oorzaak of bijdragende factor zijn bij verdrinking. Zeldzaam is de mictie syncope, waarbij de betrokkene bewusteloos in het water kan vallen tijdens of na het urineren. (3) Accidentele verdrinking wordt vooral gezien in de buurt van rivieren en dokken. Vaak is er dan sprake van dronken zeemannen die van een brug in het water terechtkomen. Door het contact met of inhalatie van het koude water kan een cardiale blok optreden als gevolg van een vasovagale shock. (4)

Bij alcoholgebruik kan een dodelijke intoxicatie optreden bij bloedwaarden vanaf 350 mg/ 100 ml. De dood treedt dan op door onderdrukking van de ademhaling via de ademhalingscentra in de hersenstam. Ook aspiratie van braaksel kan een oorzaak zijn. Alcohol lijkt het lichaam meer ontvankelijk te maken voor een vasovagale shock door de cutane vasodilatatie die het in de hand werkt. (4)

Bij verdrinking in open water wordt soms hemorragie van de spieren van schoudergordel gezien. Dit wijst op hevig slaan en vechten met de armen om niet te verdrinken, wat in deze gevallen zorgt voor losscheuren van de spier van het periost van de scapulae. (3)

Suicidale verdrinking

Deze manier van verdrinken is niet zo zeldzaam en komt het vaakst voor bij personen met een gekend psychiatrisch verleden. Een mogelijk kenmerk is het feit dat de persoon zich ontkleed heeft voor de zelfmoordpoging, of dat hij/zij zichzelf aan zware voorwerpen heeft vastgemaakt om onder water te blijven. (3) Sommigen snijden zelf hun keel over of verwonden zichzelf, terwijl zij in een positie staan waarbij ze nadien automatisch in het water vallen. (2) (4)

Vedrinking door moord

Dit type verdrinking is eerder zeldzaam. Wanneer er sprake is van moord zijn er vaak kwetsuren te vinden op het lijk die wijzen in de richting van geweld, bijvoorbeeld tekens van wurging of een trauma op het hoofd door stompe voorwerpen. Deze bevindingen zijn echter niet obligaat. (3) Soms worden zware voorwerpen gevonden waarmee de persoon of het lijk belast werd om onder water te blijven. (2) (3) Men spreekt van primaire en secundaire verdrinking door moord. Bij primaire verdrinking zijn er geen andere levensbedreigende verwondingen te vinden. Deze vorm komt vooral voor bij kinderen. Bij secundaire verdrinking is de inhalatie van water de genadeklap bovenop de andere, al dan niet zware of levensbedreigende, verwondingen. (3) De volgende criteria moeten een vermoeden van moord doen

ontstaan: geen gekende psychische ziekte, geen alcohol/barbituraten/meprobroomaat/gestegen koolstofmonoxide in het bloed, geen vergiften, verschillende tekenen van geweld (en vroeg in de morgen in bad gevonden worden door iemand die een motief heeft). (7) Ongebruikelijk is verdrinking bij ondervraging in landen die de mensenrechten schenden. Dit is “submarining”, waarbij het hoofd van de gevangene herhaaldelijk onder water wordt gehouden. (4)

Verdrinking in bad

Verdrinking in bad is vaak voorkomend. De oorzaken zijn over het algemeen in te delen in vier klassen, namelijk natuurlijke ziekte (vb. atherosclerose), drugintoxicatie, moord en zelfmoord. Meestal is de verdrinking het gevolg van een vooraf bestaand hartprobleem. (3) Bij atherosclerose is er vaak sprake van een ernstige aritmie tijdens het klaarmaken van het bad. Wanneer de drenkeling blootgesteld wordt aan heet water kan de huid loskomen (scalding). Meestal is er sprake van significante hyperemie in de farynx en luchtwegen, en (brand)wonden aan de mucosa door het hete water. (3)

Een epileptische aanval kan de oorzaak zijn van verdrinking. Vaak is de persoon dan gekend als epilepsiepatiënt of zijn er zaken die verwijzen naar epilepsie. Kenmerkend voor een epileptische aanval zijn wondjes aan de buitenzijde en tip van de tong door het bijten. Morfologische laesies zijn echter niet obligaat. (4) (3) Vaak vindt men anti-epileptische medicatie in het huis of zijn er bevindingen op het lijk die wijzen op het gebruik van phenytoïne of andere medicatie. Zo kan men meestal gingivale hypertrofie, cerebellaire atrofie en hepatomegalie aantonen. (3) Het is bij epileptici noodzakelijk om de hersenen te bekijken op zoek naar oorzaken van post-traumatische epilepsie. In sommige gevallen is myocardiële fibrose beschreven zonder het bestaan van coronaire stenose. (4)

Bij zelfmoord in de badkamer snijdt men vaak de keel of polsen over. Ook vergiftiging is een mogelijkheid en sommige mensen maken gebruik van elektriciteit. Accidenteel kan men om het leven komen door elektrocutie, of koolstofmonoxidevergiftiging wanneer men een gasboiler gebruikt om het water te verwarmen. (4) Koolstofmonoxidevergiftiging is een niet te onderschatten doodsoorzaak, vooral in de wintermaanden. Onvoldoende verluchting van de badkamer of onvolledige verbranding van het gas van een brander in de badkamer kan er voor zorgen dat de persoon in kwestie onwel wordt en het bewustzijn verliest in bad. Hierdoor kan hij of zij verdrinken in bad, of sterven aan de gevolgen van koolstofmonoxide zelf. Dit probleem zou in principe steeds minder vaak mogen voorkomen door verbeterde boilers, wetgeving omtrent verluchting en andere samenstelling van gas. (7)

Als belangrijke kanttekening kan men de spontane geboorte in het toilet of kindermoord door verdrinking van de pasgeborene aanhalen. In deze gevallen is het vooral moeilijk om aan te tonen dat de baby in leven was bij de geboorte. De diatometentest faalt vaak, aangezien gefilterd water vaak geen diatomen bevat. (3)

Een niet-specifieke bevinding bij verdrinking in staand water of warm water, zoals in bad, is de post mortem overgroei van bacteriën in de terminale bronchiolen en alveolaire ducti. Deze groei wordt vooral gevonden in de distale luchtwegen en niet in de rest van de long of andere organen. Bij gevallen met een overlevingsinterval kan er sprake zijn van diffuse alveolaire schade en bacteriële pneumonie. (3)

Verplaatsing van het lijk

Het is mogelijk dat een lijk verplaatst wordt naar water en dat verdrinking dus niet de doodsoorzaak is. Meestal is er dan sprake van moord of een overdosis. Toxicologisch onderzoek kan vaak uitsluitsel geven over de oorzaak. Wanneer er moord in het spel is, is het lijk belast met zware voorwerpen om het onder water te houden na dumping. (3)

Verplaatsen van het lijk weg van het water is veel minder voorkomend. Bij moord wordt het lijk soms verplaatst naar een afgelegen site of verbrand. Bij sommige accidentele verdrinkingen in bad wordt het lijk gedroogd en in bed gelegd om een natuurlijke dood te laten uitschijnen. Het ontdekken van longoedeem zonder hartfalen, of water in de maag en de sfenoïdale sinus, zijn belangrijke aanknopingspunten in deze gevallen. (3)

Cataleptische rigor van het kadaver wordt aanzien als een belangrijke indicator om aan te tonen dat de overledene levend in het water is beland. Hierbij worden kleren en dergelijk stevig vastgegrepen en kunnen zij krachtig in de handen vastgeklemd teruggevonden worden. (3)

Op de huid van het lijk, alsook in de mond, tussen het haar en in de oren, kan men vaak modder, olie, zand, zeewier, algen en dergelijke terugvinden. Wetenschappelijk onderzoek kan aantonen van waar dit afkomstig is en zo eventueel aantonen of het lijk meegevoerd is door de stroming vanuit een totaal andere plaats. (4)

Radiologische bevindingen bij oedeem en aspiratie

Hydrostatisch pulmonair oedeem

Hydrostatisch pulmonair oedeem ontstaat door een abnormale verhoging van extravasculair vocht als gevolg van een verhoogde druk in de pulmonaire circulatie. Dit is bijvoorbeeld het geval bij congestief hartfalen en bij een te groot intravasculair volume. (24)

Met CT worden bij hydrostatisch oedeem “ground-glass” opaciteiten gevonden. Dit zijn gebieden van de long met een verhoogde attenuatie, waarbij de onderliggende vaten niet donkerder afgebeeld worden. Zij kwamen diffuus of gevlekt en geografisch voor. Vaak zijn deze opaciteiten volgens de zwaartekracht verdeeld over de longen. Bij oedeem door verhoogd intravasculair volume is er echter vaak sprake van een voorkeursdistributie naar perifeer en subpleuraal. (24)

Bij het oedeem is sprake van verdikking van de interlobulaire septa door accumulatie van oedeemvloeistof in het interstitium. Dit is op CT terug te vinden als lineaire en reticulare opaciteiten van één tot vijf millimeter dik. Het beeld is vaak uniform. Verdikking van de interlobulaire septa werd altijd gezien in combinatie met peribronchovasculaire interstitiële verdikking. Dit is op CT te zien als een verdikking van de bronchiale wand. Het kan de centrale pulmonaire of kleinere intrapulmonaire bloedvaten groter doen lijken dan normaal. (24)

Bij congestief hartfalen kunnen de pulmonaire arteriën en venen gedilateerd zijn. Men ziet dit het makkelijkst in de parahilaire gebieden van de long, waar de arteriële en bronchiale takken tegenover mekaar bekeken kunnen worden. Centrilobulaire arteriële takken kunnen schijnbaar ook verwijd zijn, al kan dit slechts zo lijken door het omliggende oedeem. In relatie tot interlobulaire septa kan men soms verbrede longvenen aantreffen. (24)

Transsudatieve pleurale effusies kunnen meestal aangetoond worden. Onder andere als gevolg van deze effusies, kan verdikking van de interlobaire fissuren gezien worden door subpleurale accumulatie van interstitieel vocht. (24)

Aspiratie van zand

Een RX thorax van een 26-jarige vrouw, genomen één uur na een ongeval met bijna-verdrinking, toonde zand aan in de fundus van de maag en een zandbronchogram in de onderste rechter lob van de long. Een CT van de thorax toonde consolidatie aan van de onderste lob van de beide longen. Men vond ook hoog-geattenuëerd radiodens materiaal in de bronchi van de lage lob. Een CT van het hoofd toonde een lucht-vocht niveau en een vocht-zand niveau aan in de rechter sinus maxillaris. Bronchoscopie gaf een beeld van diffuse luchtweginflammatie, erytheem en een brokkelige mucosa. De follow-up CT van de thorax toonde geen overgebleven zand meer aan, maar wel kleine opaciteiten die toegeschreven werden aan atelectase en/of scarring. (25)

RX thorax bij twee patiënten met zand-aspiratie toonde bij de ene patiënt, een drenkeling, een dense tracheobronchiale opacificatie aan dat geïmpacteerd zand bleek te zijn. Bij de andere patiënt, slachtoffer van bijna-verdrinking, vond men een klein zandbronchogram. (25)

In vier gevallen van accidentele begraving met zand- en gravelaspiratie als gevolg vond men telkens een zandbronchogram met radiodens materiaal in de tracheobronchiale boom op de RX thorax. (25)

Bij RX thorax van drenkelingen, of slachtoffers van bijna-verdrinking, wordt vaak volgende abnormaliteit beschreven: nodulaire, confluerende perihilaire opaciteiten verenigbaar met pulmonair oedeem. De apex, basis en laterale longgebieden blijven meestal gespaard. Een luchtbronchogram kan, al dan niet prominent, aanwezig zijn. (25)

Radiologische bevindingen bij verdrinking

Bijna-verdrinking

In een studie met zes patiënten, welke tussen twee en vijf minuten onder water waren, bestudeerde men RX thorax en CT-scans. De RX thorax toonde bilaterale luchtopaciteiten bij alle patiënten, centraal bij vijf en diffuus bij één patiënt. De apicale zones van de longen waren gespaard bij vier van de zes patiënten, de basale delen bij alle patiënten. De CT-scans toonden bilaterale onregelmatige of diffuse zones met “ground-glass’ attenuatie bij alle patiënten. Deze was centraal bij vier, en diffuus bij twee slachtoffers. Bij drie patiënten vertoonde de attenuatie een geografisch patroon. De scan toonde bij één patiënt consolidatie aan. Bij vier slachtoffers was er sprake van slecht gedefinieerde centrilobulaire nodules en/of opaciteiten in de vertakkingen. Fijne intralobulaire reticulair opaciteiten in de gebieden met ground-glass attenuatie (crazy-paving) werden gevonden bij drie patiënten. Dit is een niet-specifiek gegeven dat gezien kan worden bij verschillende interstiële longziekten. Interlobulaire verdikking van het septum werd teruggevonden bij één patiënt. In twee gevallen vond men peribronchiale of perivasculaire luchtdensiteit wat interstitieel pulmonair emfyseem en pneumomediastinum doet vermoeden. (15)

Initiële röntgenfoto’s van de thorax kunnen diffuus, perihilair of gelokaliseerd pulmonair oedeem tonen. Er kan echter ook helemaal niets te vinden zijn, ook al toont de kliniek duidelijk oedeem aan. Bilaterale symmetrische perihilaire opaciteiten zijn de meest voorkomende bevindingen. CT bleek in de studie van Kim et al niet meer informatie te bieden dan de RX thorax. (15)

Verdrinking (CT tov. autopsie)

In de studie van Christe et al werd enkel gebruik gemaakt van gegevens over drenkelingen die omkwamen in zoet water. De pathofysiologie is hierbij anders dan verdrinking in zout water. De resultaten kunnen dus onderling verschillen. De controlegroep bestaat uit slachtoffers van bijna-verdrinking. (26) Levy et al gebruikte als controlegroep personen die stierven aan atherosclerotische coronaire hartziekte. (27)

Paranasale sinussen en mastoid

Christe et al toonde aan dat bij alle drenkelingen water te vinden was in de maxillaire en sphenoidale sinussen, terwijl dit bij de controles veel minder het geval was. Er werd een waterige inhoud teruggevonden in de frontale sinussen bij zeventig procent en in de ethmoïdale bij tachtig procent. Dit werd eveneens veel minder aangetroffen bij de controles. (26) Ook Levy et al toonde aan dat bij alle drenkelingen water aanwezig was in de paranasale sinussen en bilateraal in de caviteiten van het mastoid. Vijfentwintig procent had ook sterk geattenuëerd materiaal op de bodem van de maxillaire en sphenoidale

sinus. Dit werd bevestigd door autopsie en stemde overeen met geïnhaled sediment. In de controlegroep vond men vocht in het mastoid bij vijftig procent. Tien van de twaalf controles hadden vocht in één of meerdere sinussen. Bij hen werd echter geen sediment gevonden in de sinussen of luchtwegen. (27)

Luchtwegen

De studie van Christe et al toonde aan dat bij elk geval zowel op CT als bij autopsie vocht te vinden was in de luchtwegen. Dit werd voornamelijk gedetecteerd ter hoogte van de hoofdbronchi, die voor twee derden gevuld waren. In de kleinere bronchi was ongeveer de helft van het lumaal volume geoblitereerd. In tachtig procent van de gevallen werd met CT ook vocht aangetoond in de pharynx, terwijl er bij autopsie slechts vijftig procent ontdekt werd. Bij zestig procent werd geaspireerd vocht in de longen gedetecteerd, tegenover tien procent bij autopsie en dertig bij histologisch onderzoek. (26) Levy et al vond in zesentwintig gevallen vocht in de trachea en hoofdbronchi. Voor de controlegevallen was dit ongeveer evenveel. Bij de twee overblijvende drenkelingen vond men bilateraal vocht in de secundaire bronchi. Vijftig procent had hoog-geattenuëerd sediment in de distale trachea en hoofdbronchi. Dit sediment werd ook aangetoond met autopsie. Zij besluiten dat dit sediment zeer suggestief is voor verdrinking. (27)

Het emphysema aquosum werd door Christe et al aangetoond aan de hand van de diafragma-stand, de bronchio-arteriële coëfficiënt en het mozaïekpatroon van de hypo- en hypergeperfundeerde gebieden van de longen. De stand van het diafragma was lager bij verdrinking, zowel bij CT als autopsie. De bronchio-arteriële coëfficiënt is de diameter van de bronchus gedeeld door de diameter van de pulmonaire arterie. Het is een teken van bronchospasme en/of waterresorptie. Bij verdrinking is deze coëfficiënt lager. Dit werd histologisch bevestigd. Het mozaïekpatroon was aanwezig in zestig procent van de gevallen, tegenover tien procent bij de controle. Het werd beter gevisualiseerd met CT dan bij autopsie. (26)

Pulmonair oedeem kon met CT aangetoond worden in vijftig procent van de gevallen. Pleurale effusie bij zeventig procent, maar wel bij tachtig procent met autopsie. De controles vertoonden slechts bij zestien procent pleurale effusie. Een schuimprop werd zowel bij CT als autopsie in twintig procent van de gevallen aangetoond. (26) Levy et al toonden bij eenentwintig procent van de drenkelingen een schuimig vocht aan in de luchtwegen, tegenover elf procent van de controles. Zij besluiten dat dit schuimig vocht zeer suggestief is voor verdrinking. Pleurale effusie kwam voor bij achtenzestig procent van de slachtoffers. Bijna negentig procent van de drenkelingen vertoonden pulmonaire ground-glass opaciteiten met septale tekening. Soms werden de secundaire pulmonaire lobes gespaard. Deze ground-glass opaciteiten kwamen voor bij alle controles. Een lichte pneumothorax werd bilateraal aangetroffen in drie gevallen zonder uitgesproken ontbinding. Bij drie gevallen met uitgesproken ontbinding werd bilateraal een gemiddelde pneumothorax aangetroffen. Er is dus een overlap tussen drenkelingen en controlegroep wat betreft vocht in de sinussen, trachea en bronchi. Dit is ook het geval voor de ground-glass opaciteiten,

waarschijnlijk is het cardiogeen oedeem hier de oorzaak van. (27) De opaciteiten zijn zeer gelijkend op deze gevonden door Kim et al in gevallen van bijna-verdrinking met als verschil dat Kim et al vooral centrale distributie vinden, tegenover apicale en perihilaire distributie bij Levy et al. (15) (27)

De vlekken van Paltauf, een klassiek gegeven bij verdrinking, konden niet aangetoond worden met CT door Christe et al. Nochtans zijn zij aanwezig in zeventig procent van hun gevallen. Dit ligt aan het feit dat deze pleurale afzettingen van hemoglobine, gevormd na hemolyse, te klein zijn om zichtbaar te zijn met CT. MRI zou hier een oplossing kunnen bieden. (26)

Hart en bloedvaten

CT kon geen significant verschil aantonen in hartgrootte tussen drenkelingen en controles in de studie van Christe et al. Dertig procent vertoonde een vergroot hart op CT, veertig procent bij autopsie. Zeventig procent van de controles hadden een vergroot rechteratrium. De CT toonde wel bij een groter percentage van de gevallen het vergroot rechteratrium of ventrikel aan dan autopsie. Er werd een vergroot rechteratrium aangetroffen in zestig procent tegenover veertig, en een vergroot rechterventrikel in veertig tegenover twintig procent van de gevallen. (26)

De gemiddelde densiteit van het bloed in het rechter atrium was 50 HU, tegenover 64 HU bij de controles. Dit is een significant verschil in densiteit. Een bloeddensiteit lager dan 55HU zou indicatief zijn voor hemodilutie. Het linker atrium toonde een klein verschil van 5 HU. (26)

Maag en duodenum

Bij Christe et al had de maag gemiddeld een inhoud van 470 ml. Dit werd bevestigd met autopsie waarbij men een gemiddelde inhoud van 480 ml terugvond. Bij de controlegroep werd slechts de helft van dit volume teruggevonden. De inhoud was bij de drenkelingen meer gedilueerd met een gemiddelde van 20 HU, tegenover 39 HU bij de controles. Het duodenum was verbreed door een waterige inhoud in negentig procent van de gevallen, tegenover zestig procent van de controlegevallen. Zowel maag als duodenum zijn dus verbreed, maar alleen bij het duodenum is er sprake van een significant verschil ten opzichte van de controlegevallen. (26) Levy et al toonde een maagdistentie aan in bijna negentig procent van de gevallen, waarvan er bij zes personen sediment kon aangetoond worden. Dit werd bevestigd door autopsie. In de controlegroep had iedereen een gecollabeerde maag en kon men geen sediment aantonen. (27)

	CT-scan	AUTOPSIE	CONTROLE
Water in maxillaire en sfenoidale sinussen	100%		<100%
Water in frontale sinussen	70%	<70%	minder
Water in ethmoidale sinussen	80%	<80%	minder
Hoog-geattenuerd materiaal bodem maxillaire en sfenoidale sinussen	25%	25%	
Vocht in farynx	80%	50%	
Geaspireerd vocht in de longen	60%	10%	
Vocht in trachea en hoofdbronchi			
Mozaiekpatroon	60%		10%
Pulmonair oedeem	50%		
Pleurale effusie	70%	80%	16%
Schuimprop	20%-21%	20%	11%
Ground-glass opaciteiten	90%		100%
Vlekken van Paltau	0%		70%
Vergroot hart	30%	40%	
Vergroot rechteratrium	60%	40%	
Vergroot rechterventrikel	40%	20%	
Densiteit bloed rechter atrium	50 HU		64 HU
Maaginhoud	470 ml	480 ml	240 ml
Dilutie maaginhoud	20 HU		39 HU
Verbreed duodenum	90%		60%
Maagdistentie	+/- 90%	+/- 90%	Gecollabeerde maag

Bijna-verdrinking tov. verdrinking

In het geval van bijna-verdrinking is het vinden van een ground-glass patroon dominant bij CT. Er is hier geen sprake van emphysema aquosum. Bij verdrinking vindt men vooral primaire luchtconsolidatie als gevolg van pulmonair oedeem en/of aspiratie. (26)

Arteriële gasembolie (AGE) komt voor na barotrauma en is vaak de doodsoorzaak in deze gevallen. Lucht kan enerzijds ontsnappen in de lichaamsconcaviteiten, wat pneumothorax en pneumomediastinum tot gevolg heeft. Anderzijds kan het ook in de pulmonaire venen terechtkomen, wat arteriële gasembolie geeft. De luchtbellen komen vervolgens terecht in caudale gebieden, zoals het hart, in posities waarbij het hoofd naar beneden hangt. Dit heeft myocardinfarct als klinische manifestatie. Wanneer het hoofd naar boven gericht is komen de gasbellen terecht in de cerebrale bloedvaten, wat leidt tot een beroerte. (28)

Oliver et al bestudeerden vier gevallen. Bij de eerste duiker toonde de CT-scan gas in de bloedvaten van het hart, de hersenen en andere vaten. Er werd ook gas aangetoond in de pleurale caviteiten. Autopsie toonde gas aan in het linker ventrikel, de aortaboog en de hersenen. Additioneel werden tekens van pulmonair oedeem, myocardinfarct, coronaire atherosclerose en een vervette lever gevonden. De CT van de tweede drenkeling gaf een systemische luchtembolie aan, alsook cerebrale gasembolie. Bij de autopsie vond men hyperinflatie van de longen met tekenen van pulmonair barotrauma en verdrinking. Het linker trommelvlies was gescheurd en er werd bloed gevonden in beide binnenoren. Het derde slachtoffer had een CT waarop men lucht in de coronairen, lever en milt kon zien. Er was verlies in differentiatie tussen de witte en grijze massa in de hersenen, wat kan wijzen op hypoxische ischemie. De autopsie toonde lucht aan in de posterieure coronairen, de LAD en de femorale arteriën. De longen vertoonden hyperinflatie en tekens van pulmonair oedeem. Bij de laatste duiker waren er op CT kleine luchtbellen te zien in de lever en de rechterzijde van het hart. Er werden tekenen van verdrinking gevonden in de longen en hersenen. Dit werd bevestigd bij autopsie. Lucht werd gevonden in het rechterventrikel. De luchtbellen waren waarschijnlijk het gevolg van post mortem veranderingen. Bij drie van de vier gevallen kon CT dus reeds voor autopsie de diagnose van AGE stellen, in het vierde geval kon CT helpen bij de diagnose van verdrinking. Men moet in het achterhoofd houden dat intravasculair gas ook aanwezig kan zijn om andere redenen zoals bijvoorbeeld gasproductie bij putrefactie en post mortem decompressie (off-gassing). (28)

Naar aanleiding van het mogelijke off-gassing artefact hebben Cole et al de relevantie van post mortem CT-scan voor de diagnose van cerebrale arteriële gasembolie onderzocht. Zij gebruikten hiervoor zeven Merino schapen, waarbij zij een barotrauma nabootsten. Zij vonden met CT dat geen elk schaap binnen het uur significante gascollecties vertoonde in weefsel of bloedvaten. Binnen 24 uur echter ontwikkelden alle schapen significante hoeveelheden gas in hun vasculair systeem. Dit werd bevestigd door autopsie. Geen enkel controledier vertoonde gasontwikkeling binnen de 24 uur, na deze periode werden echter wel kleine hoeveelheden gas gevonden in de cadavers. Zij besluiten dat CT niet aan te raden is als methode om te bepalen of cerebrale arteriële gasembolie is opgetreden. Intravasculair gas komt waarschijnlijk sowieso na bepaalde tijd post mortem voor als gevolg van off-gassing. Enkel CT-bewijzen van pneumothorax, pneumomediastinum of pulmonair emfyseem kunnen volgens Cole et al

gebruikt worden om pulmonair barotrauma aan te tonen. Zij sluiten echter niet uit dat een CT die uitgevoerd wordt binnen één à twee uur na het fatale ongeluk nuttig kan zijn als het cerebraal intravasculair gas aantoont, omdat in het onderzoek binnen die tijdsspanne geen gas aantoonbaar was. (29)

Bevindingen Virtopsy© Project

De voorlopige conclusie van het Virtopsy© project omtrent verdrinking zijn hieronder opgesomd. Zij stellen dat er eerder typische dan specifieke bevindingen te noteren zijn. (30)

Volgens Christe et al. is er meestal een schuimprop of vocht te vinden in de luchtwegen (tot het niveau van de hoofdbronchi). Het bronchospasme bewerkstelligt een lage diafragmastand en emphysema aquosum. Bij zoet water verdrinking vindt men in zestig procent van de gevallen een mozaïekpatroon in het longparenchym. Dit is het gevolg van hyper- en hypoperfusie en aspiratie. De resorptie van zoet water zorgt voor hypodens bloed door hemodilutie. Dit kan op zijn beurt leiden naar hartfalen. Zout water geeft aanleiding tot pulmonair oedeem. De paranasale sinussen zijn door influx altijd gevuld met water. Ook kan een uitgezette maag en duodenum gevonden worden door de hoeveelheden ingeslikt water. (30)

Bibliografie

1. **Papadodima Stavroula A., Sakelliadis Emmanouil I., Kotretsos Panagiotis S., Athanaselis Sotiris A., Spiliopoulou Chara A.** Cardiovascular Disease and Drowning: Autopsy and Laboratory Findings. *Hellenic J Cardiology*. 2007, 198-205.
2. **Payne-James Jason, Busuttil Anthony, Smock William.** *Forensic medicine: clinical and pathological aspects*.
3. **Pollanen, Michael S.** *Forensic diatomology and drowning*.
4. **Knight Bernard, Saukko Pekka.** *Knight's forensic pathology*.
5. **Piette Michel H.A., De Letter Els A.** Drowning: still a difficult autopsy diagnosis. *For Sci Int*. 2006, 163:1-9.
6. **Reh, Herbert.** *Diagnostik des Ertrinkungstodes und Bestimmung der Wasserzeit*.
7. **Devos Ch., Timperman J., Piette M.** Deaths in the bath. *Med Sci Law*. 1985, 25: 189-200.
8. **Betz P., Nerlich A., Penning R., Eisenmenger W.** Alveolar macrophages and the diagnosis of drowning. *For Sci Int*. 1993, 62: 217-227.
9. **Hadley Jeffrey A., Fowler David R.** Organ weight effects of drowning and asphyxiation on the lungs, liver, brain, heart, kidneys, and spleen. *For Sci Int*. 2003, 133: 190-196.
10. **Azparren JE., Cubero C., Perucha E., Martinez P., Vallejo G.** Comparison between lung weight ratio and blood strontium in bodies found in seawater. *For Sci Int*. 2007, 128-132.
11. **Zhu Bao-Li, Quan Li, Li Dong-Ri, Taniguchi Mari, Kamikodai Yasunobu, Tsuda Kohei, Fujita Masaki Q., Nishi Katsuji, Tsuji Tsotomu, Maeda Hitoshi.** Postmortem lung weight in drownings: a comparison with acute asphyxiation and cardiac death. *Legal Medicine*. 2003, 5: 20-26.
12. **Nishitani Yoko, Fuji Kenichi, Okazaki Shunichiro, Imabayashi Kiyomi, Matsumoto Hiroshi.** Weight ratio of the lungs and pleural effusion to the spleen in the diagnosis of drowning. *Legal Medicine*. 2006, 8: 22-27.
13. **Hayashi Takahito, Ishida Yuko, Mizunuma Shinya, Kimura Akihiko, Kondo Toshikazu.** Differential diagnosis between freshwater drowning and saltwater drowning based on intrapulmonary aquaporin-5 expression. *Int J Legal Med*. 2009, 123: 7-13.
14. **An Jun-Ling, Ishida Yuko, Kimura Akihiko, Kondo Toshikazu.** Immunohistological examination of intracerebral aquaporin-4 expression and its application for differential diagnosis between freshwater and saltwater drowning. *Int J Legal Med*. 2011, 125: 59-65.
15. **Kim Kun-Il, Lee Ki nam, Tomiyama Noriyuki, Johkoh Takeshi, Ichikado Kazuya, Kim Chang Won, Lee Suk Hong.** Near-drowning: thin-section CT findings in six patients. *Jl Comput Assist Tomogr*. 2000, 4:562-566.

16. **Lucci Arturo, Campobasso Carlo P., Cirnelli Antonello, Lorenzini Giulio.** A promising microbiological test for the diagnosis of drowning. *For Sci Int.* 2008, 182: 20-26.
17. **Maeda Hitoshi, Zhu Bao-Li, Ishikawa Takaki, Quan Li, Michiue Tomomi, Bessho Yasumori, Okazaki Shuji, Kamikodai Yasunobu, Tsuda Kohei, Komatsu Ayumi, Azuma Yoko.** Analysis of postmortem biochemical findings with regard to the lung weight in drowning. *Legal Medicine.* 2009, 11: S296-S272.
18. **Usumoto Yosuke, Sameshima Naomi, Hikiji Wakako, Tsuji Akiko, Kudo Keiko, Inoue Hiromasa, Ikeda Noriaki.** Electrolyte analysis of pleural effusion as an indicator of drowning in seawater and freshwater. *Journal of Forensic and Legal Medicine.* 2009, 16: 321-324.
19. **Piette Michel, Desmet Bernard, Dams Richard.** Determination of strontium in human whole blood by ICP-AES. *Sci Total Environ.* 1994, 141: 269-273.
20. **Lorin de la Grandmaison Geoffroy, Leterreux Michel, Lassegueutte Karine, Alvarez Jean-Claude, de Mazancourt Phillipe, Durigon Michel.** Study of the diagnostic value of iron in fresh water drowning. *For Sci Int.* 2006, 157:117-120.
21. **Piette M., Timperman J., Parisis N.** Serum Strontium Estimation as a Medico-Legal Diagnostic Indicator of Drowning. *Med Sci Law.* 1989, 29: 162-171.
22. **Aoyagi Miwako, Iwadata Kimihari, Fukui Kenji, Abe Shuntaro, Sakai Kentaro, Maebashi Kyoko, Ochiai Eriko, Nakamura Mihoko.** A novel method for the diagnosis of drowning by detection of *Aeromonas sobria* with PCR method. *Legal Medicine.* 2009, 11: 257-259.
23. **Tester David J., Kopplin Laura J., Creighton Wendy, Burke Allen P., Ackerman Michael J.** Pathogenesis of Unexplained Drowning: New Insights From a Molecular Autopsy. *Mayo Clin Proc.* 2005, 80(5): 596-600.
24. **Storto Maria L, Kee Stephen T, Golden Jeffrey A, Webb Richard W.** Hydrostatic pulmonary edema: high-resolution CT findings. *Am J Roent.* 1995, 165:817-820.
25. **Dunagan Donnie P, Cox Joseph E, Chang Michael C, Haponik Edward F.** Sand aspiration with near-drowning: radiographic and bronchoscopic findings. *Am J Respir Crit Care Med.* 1997, 156:292-295.
26. **Christe Andreas, Aghayev Emin, Jackowski Christian, Thali Michael J, Vock Peter.** Drowning: post-mortem imaging findings by computed tomography. *Eur Radiol.* 2008, 18:283-290.
27. **Levy Angela D, Harcke Theodore H, Getz John M, Mallak Craig T, Caruso James L, Pearse Lisa, Frazier Aletta A, Galvin Jeffrey R.** Virtual Autopsy: two- and three-dimensional multidetector CT findings in drowning with autopsy comparison. *Radiol.* 2007, 243:862-868.
28. **Oliver J, Lyons TJ, Harle R.** The role of computed tomography in the diagnosis of arterial gas embolism in fatal diving accidents in Tasmania. *Australian Radiology.* 1999, 43:37-40.

29. **Cole A J, Griffiths D, Lavender S, Summers P, Rich K.** Relevance of postmortem radiology to the diagnosis of fatal gas embolism from compressed air diving. *J Clin Pathol.* 2006, 59:489-491.

30. **Christe Andreas, Flach Patricia, Ross Steffen, Spendlove Danny, Bolliger Stephan, Vock Peter, Thali Michael J.** Clinical radiology and postmortem imaging (Virtopsy) are not the same: Specific and unspecific postmortem signs. *Legal Medicine.* 2010, 12: 215-222.

Bron: **Lynnerup, Niels.** Medical Imaging of Mummies and Bog Bodies - A mini review. *Gerontology*. 2010, 56: 441–448

Gerontology

Mini-Review

Gerontology 2010;56:441–448
DOI: [10.1159/000266031](https://doi.org/10.1159/000266031)

Received: June 25, 2009
Accepted: October 12, 2009
Published online: December 11, 2009

Medical Imaging of Mummies and Bog Bodies – A Mini-Review

Niels Lynnerup

Laboratory of Biological Anthropology, Department of Forensic Medicine, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

Key Words

Mummy · Bog body · Paleopathology · CT scan · Radiography

Abstract

Mummies are human remains with preservation of non-bony tissue. Mummification by natural influences results in so-called natural mummies, while mummification induced by active (human) intervention results in so-called artificial mummies, although many cultures practiced burial rites which to some degree involved both natural and artificial mummification. Since they are so uniquely well-preserved, mummies may give many insights into mortuary practices and burial rites. Specifically, the presence of soft tissues may expand the scope of paleopathological studies. Many recent mummy studies have focused on the development and application of non-destructive methods for examining mummies, especially radiography and CT scanning with advanced 3D visualizations. Indeed, the development of commercially available CT scanners in the 1970s meant that for the first time the 3D internal structure of mummies and bog bodies could be studied non-destructively. This article describes the history of mummy radiography and CT scanning, and some of the problems and opportunities involved in applying these techniques, derived for clinical use, on naturally

and artificially preserved ancient human bodies. Unless severely degraded, bone is quite readily visualized, but accurate imaging of preserved soft tissues, and pathological lesions therein, may require considerable post-image capture processing of CT data.

Copyright © 2009 S. Karger AG, Basel

By definition, mummies and bog bodies are human (or animal) remains with preservation of non-bony tissue. Depending on mortuary practices, the natural environment and the time span since death, soft tissue preservation may be excellent or very poor, and there really is no exact boundary line between a skeleton with some preserved soft tissue (skin remnants, ligaments, etc.) and a mummy. However, the word mummy is generally used when soft tissue preservation is so pronounced that body parts, or the whole body, have somewhat intact skin and some preserved internal structures such as muscle fasciae, ligaments and maybe even tissue of internal organs and muscle [1].

Soft tissue is preserved when the postmortem conditions are such that the usual tissue degradation, including the action of bacteria and insects, is hindered. At its most basic, this is a question of tissue dehydration overtaking tissue postmortem decay. This may be achieved either

KARGER

Fax +41 61 306 12 34
E-Mail karger@karger.ch
www.karger.com

© 2009 S. Karger AG, Basel
0304-324X/10/0565-0441\$26.00/0

Accessible online at:
www.karger.com/ger

Niels Lynnerup
Laboratory of Biological Anthropology, Panum Institute
Blegdamsvej 3
DK-2200 Copenhagen N (Denmark)
Tel. +45 3532 7239, Fax +45 3532 7215, E-Mail n.lynnerup@antrolab.ku.dk

naturally due to environmental conditions such as a hot or very cold, dry climate, or it may be facilitated by mortuary practices that in a fashion mimic these environmental conditions, such as removal of internal organs and drying out of body cavities. Mummification by the former influences hence results in so-called natural mummies, while mummification induced by active (human) intervention results in so-called artificial mummies. The word mummy itself is derived from the old Persian word, *mumeia*, or *mum* (Arabic: *mumiya*) for bitumen or pitch. Medicinal properties were ascribed to this substance which flowed from the Mummy Mountain in Persia [2]. Since mummies often presented themselves as blackened or dark due to the desiccation of the skin, it was thought that bitumen and asphalt were materials used by the ancient Egyptians in their mummification processes (spanning the time period of ca. 3000 BC to the Roman era), so the word came to designate embalmed bodies [2].

Mummies and bog bodies present unique opportunities for many scientific fields. Since they are so uniquely well-preserved, both natural and artificial mummies may give specific insights into mortuary practices and burial rites. This may also be due to a parallel preservation of associated artifacts like clothing, tools and utensils. The mummified body itself may reveal body ornamentation, such as tattoos and details on hair style, etc. The presence of soft tissues may expand the scope of pathological studies, so that more acute diseases and diseases which do not affect bone tissue may be identified [3, 4]. The mummification and preservation of the various soft tissues, though, is very variable. Interior organs, particularly of the digestive system, are often completely decomposed, and organs may be very shrunken and difficult to identify morphologically due to desiccation. Furthermore, various funerary rites comprising embalming and evisceration may entail the complete removal of internal organs and the brain. Generally, the soft tissues most often preserved are tissues with a high content of collagen, like the dermis, muscle fasciae and tendons. Still, even just the presence of skin may give important clues to pathology and trauma, e.g., penetrating wounds and cuts, scars and even warts. Better soft tissue preservation may also be indicative of good aDNA preservation, perhaps also allowing identification of pathogen DNA. Finally, gut contents may also be seen, allowing for detailed paleodietary studies, which may complement stable isotope-based studies [1].

However, the very presence of soft tissue, especially the skin, at the same time makes it difficult to examine

the body. One may conduct an 'autopsy', but while such mummy autopsies have often been carried out [2, 4], most archaeologists, conservators, and indeed osteologists and pathologists, are not always too enthusiastic about this. An autopsy is an invasive and destructive procedure, meaning that the integrity of the mummy or bog body as an archaeological specimen may be destroyed. The attitude has perhaps shifted from an earlier more clinical, medical approach to mummies (in a certain sense seeing the body as any other unidentified body which must be properly examined in a forensic way) to one of recognition that a mummy is an invaluable archaeological artifact. This has meant that more emphasis is being placed on the development of non-destructive methods for examining mummies, including especially radiography and CT scanning with advanced 3-dimensional visualizations [1, 5]. Noninvasive procedures also mean that the mummified body is kept intact, i.e. the bodily integrity is upheld, a valuable point in cases where there are ethical considerations, e.g. reverence for the dead.

When discussing X-rays and CT scanning of mummies, there is sometimes the question of whether MRI is also an applicable method for mummy investigations. By far most mummies are completely desiccated, which rules MRI out (as MRI is dependent on hydrogen ions, i.e. water). However, recently in a preliminary study, Rühli et al. [6] have shown that MRI may in fact be possible without rehydration.

X-Rays and Mummies

The most well-known noninvasive technique for visualizing the internal structures of mummies and bog bodies employs X-rays. Indeed, the first use of X-rays in mummy research occurred only one year after William Röntgen discovered X-rays in 1895 [7]. Petrie [8] used X-rays in his studies of Egyptian mummies in 1897. Moodie [9] published the findings of his analyses of 17 Egyptian mummies at the Field Museum in Chicago in 1931; this probably constitutes the first systematic X-ray analysis of a major mummy collection. All the royal mummies housed at the Cairo Museum were X-rayed in 1967 [10, 11]. X-raying of mummies has also been performed on-site in some very remote locations [12, 13].

The primary focus of X-raying mummies has often been archaeological as well as medical; e.g., searching for amulets in Egyptian mummy wrappings. However, the determination of sex and age, based on skeletal traits, has usually been carried out whenever possible [14]. Smith

[15] judged the epiphyseal union of the mummy of Tuthmosis IV in order to ascertain age at death. Cranial traits and cranial morphometry based on X-rays have been studied in order to try to establish kinship [11]. This pre-empted one of the uses of CT scanning: the production of 3D solid models of skulls for facial reconstruction purposes (see below). Neave [16] managed to make a facial reconstruction of an Egyptian mummy based on radiographs.

The pathological changes observed by X-raying mummies include arthritis, atheroma, healed fractures, and parasite-induced changes [11, 17, 18]. Most of the pathological processes observed reflect diseases affecting bone or calcified structures, such as a radiodense structure which, at a later autopsy, was revealed to be a guinea worm parasite. This is a reflection of the limitations of X-rays. Skeletal structures are usually easily identifiable due to the high attenuation, but it may be very difficult to discriminate between various soft tissue remains, especially as these will be superimposed on top of each other on the X-ray film. The skin and fasciae of the ventral aspect of a mummy will thus be superimposed over the remains of interior organs and interior membranes and fasciae, as well as the skin and fasciae of the dorsal aspect. Since the soft tissues may already have nearly equal attenuation coefficients, this greatly inhibits the possibilities for investigating soft tissue pathology.

CT Scanning

A further development of X-raying came with the advent of CT scanners (fig. 1). Unlike conventional X-ray images, the regions of interest in CT scanings are presented without disturbing superimpositions of juxtaposed structures [19].

CT scanning of mummies was first carried out in 1977 [20, 21]. Eleven mummies at the Museum of Fine Arts in Boston were CT scanned by Marx and d'Auria [22] in what was then the most systematic CT scanning of a collection of mummies. The increasing computing power enabled imaging with an ever finer resolution and rapid 3D visualizations [23, 24]. Basically, the CT scanner computer 're-stacks' the single slices and, based on different algorithms, connects object boundaries between the slices [25]. CT scanners used in hospitals come equipped with various computer programs which allow rapid image building and 3D visualization, but it must be noted that the software is developed for medical purposes, and tuned to tissues and organ systems of the living. For ex-

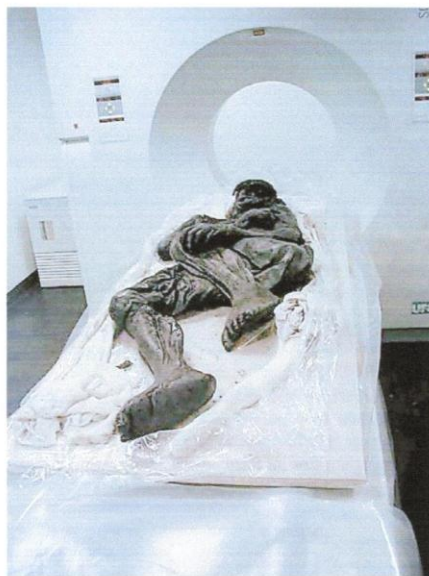


Fig. 1. CT scanning of the Borremose Woman (photo: N. Lynnerup).

ample, the Hounsfield units associated with living bone do not vary much (pathology and very thin bones aside), so it is easy to pre-program a 3D rendering of the skeletal tissues in a CT scanner, so that, e.g., the skull of a scanned patient can be visualized just by a click on the appropriate menu. Mummies, and especially bog bodies, may require much more work at this stage (see below). Large, detailed studies on embalming techniques and mummy wrappings of Egyptian mummies (fig. 2), also employing 3D imagery, have lately been performed by Hoffman et al. [26].

Recently, three Inca mummies were found on top of Mount Llullaillaco, the highest mountain in Argentina. Due to the extreme height, the 500-year-old mummies were frozen. This meant that the internal organs were exceptionally well-preserved, and easily visible upon CT scanning [27].

The benefits of 3D visualization also apply to the assessment of possible pathological changes. For example,

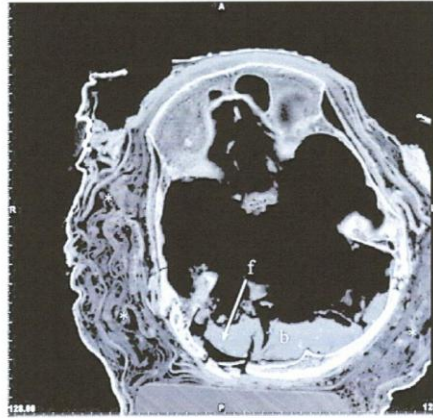


Fig. 2. A single slice through an Ptolemaic Period Egyptian mummy (Carlsberg Gyptotek Museum, Copenhagen, Denmark). The many layers of wrapping are clearly seen (marked by asterisks). The scan is of the head, and the cranial vault is clearly seen. The brain has been removed as was customary for the embalming techniques (although there are some remains in the back of the vault, marked 'b'). This was done through the nasal aperture and ethmoid, and the bony structures in this area were indeed fractured (not shown in this figure). Since the brain has been removed, the CT scanner renders the cranial cavity black. The skull fracture seen in the back of the vault occurred postmortem (marked 'f').

a mummy which had already been scanned in 1983 [28] was re-scanned in 1990 in order to make 3D visualizations of the skull and pelvis to confirm a possible fracture [24]. Dental disease has also been visualized in this way [29], as has an Egyptian mummy where an intravital foreign object (presumably a toe prosthesis) was found [30]. However, given all the mummies which have been CT scanned, pathological or traumatic finds have been rather sparse. Probably one of the more well-known cases involved the CT scanning of the Iceman, a glacier mummy dating back some 3,000 years, found in Italy in 1992. The mummy had been X-rayed and CT scanned after the find [31]. However, not until a renewed scanning 10 years later was an arrowhead identified in the left shoulder region [32]. Rheumatoid arthritis has been diagnosed based on CT-visualized bone erosions and joint subluxation [33]. A CT scan of a natural mummy from the 19th century,

found in an ancient friary in Italy, revealed a distended bladder and a ring of dense tissue at the site of the prostate, indicative of prostatic hyperplasia [34]. Bone tumors have been identified in two Egyptian mummies [35]. Bone pathology as observed by CT scanning, indicative of tuberculosis, has been correlated with aDNA analyses [Pap, personal communication].

It should be mentioned that CT scanning has also been used to locate pathological processes or specific organs in order to make precise incisions to perform biopsies [36] or to guide endoscopic examinations [37].

Problems in Mummy and Bog Body CT Scanning and 3D Visualization

The presence of many layers of mummy wrappings, especially those closely adhering to the skin, as well as organ removal, etc., may impede interpretation of the body structures of a mummy. Diagenetic changes, mainly desiccation, may also have an impact. However, in both natural and artificial mummies, the skeletal structures are usually intact. This means that structures useful for aging and sexing may still be visualized. Availability of the skeletal images also results in having many 'point de repere', which makes it easier to assess remains of internal organs and structures.

Special problems of X-raying and CT scanning arise when the diagenetic changes are so massive that the remaining tissues, including bone, are severely degraded. This is perhaps best shown by bog bodies, all of which date to the northern European Iron Age (approximately 500 BC–500 AD). X-rays and CT scans share two major differences between bog body and clinical images. Due to the acidic bog environment, calcium is leached from the bones, causing a demineralization of the bony tissues, which consequently lose their hardness and become pliable [38]. When a bog body is X-rayed, bones are often very badly visualized. The bones appear as though they were made of glass. This may be demonstrated by the X-rays taken of the Grauballe Man, a Danish bog body from the Iron Age, excavated in 1950 and X-rayed in 1955 [39]. Consequently, CT scanning a bog body (and applying the same range of Hounsfield units for bones, as for clinical work) may result in the bones not being visualized at all. Furthermore, the demineralization is not necessarily uniform, but may differ within the skeletal system or the single bone due to the diagenetic microenvironment. This may generate a patchy appearance of the bone, even though it is intact morphologically (fig. 3). The second

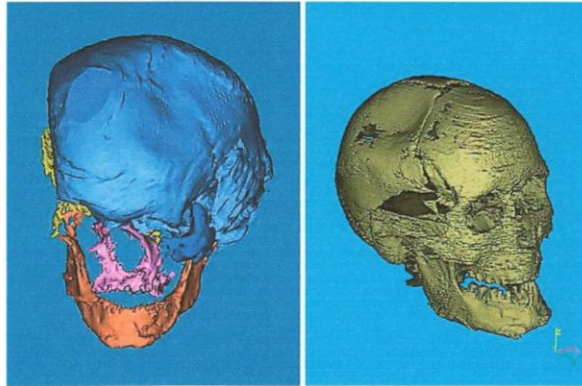


Fig. 3. The skull of the Tollund Man (right) and the Grauballe Man (left). Note the impressions in the parietal region due to diagenesis (softening of the bone due to loss of mineralization, so that it bends under soil pressure).

difference is the fact that other tissues seem to acquire a more radiodense structure (i.e. the attenuation of the X-ray beams is increased). This is especially seen in some of the connective tissues, e.g. ligaments, fasciae and the subcutis. The reason for this is probably a deposition of soil mineral salts (containing metals as iron) in collagenous tissues [39]. The extent to which the bog environment may have an effect on bog bodies can be illustrated by our work on three such recently found bog bodies from Ireland (Clony Cavan Man, Old Man Croghan, and Derry Cashel; results to be published). These bog bodies have recently been subjected to a series of scientific studies, including CT scanning. The head of Clony Cavan Man shows extreme lateral flattening, with a facial breadth of only approximately 2–3 cm. The humeri of Old Man Croghan are an example of differential preservation: the right humerus is intact enough to be readily recognizable, while the left humerus is very difficult to visualize.

Many bog bodies are also shrunken. While some shrinking may take place in the bog, most shrinkage is probably due to the drying out of the bog bodies when they are excavated. Drying out was previously the only preservation and conservation method to handle excavated 'wet' bog bodies. In the mid-20th century more targeted methods were used, such as attempts to substitute the water with alcohols and tannic oils, bark extracts and wax, while today freeze-drying is used. Whatever the method, some shrinkage is probably inevitable, but may be pronounced especially for the older bog finds [39].

Thus, diagenetically modified tissues and organs may have to be delineated (or segmented) manually on almost every single slice. At present, features allowing manual slice-by-slice image editing are seldom available on the computer programs of the (clinical) CT scanners. The images therefore need to be transferred to another program which allows editing (post-processing) of the CT data [5].

Post-Processing of CT Scan Images

Several computer programs exist that allow post-processing of the CT data, especially the very important ability to manually edit the single image slices. In order to visualize, e.g., the head of the Grauballe Man, color coding is applied 'over' the single gray scale pixels. The color coding is done simply to discern different tissues, organs and structures, much akin to anatomy illustrations. This usually involves a process of identifying the single structures on the single slice images and then following these structures through on the adjacent slices. For example, the bones of the skull may first be picked out, then the brain, etc. All the single slices have to be edited, so that ultimately the individual structures are completely delineated (segmented). The color-coded pixels associated with the various structures may then be extracted, and used as a basis for 3D rendering of specific tissues and structures [1].



Fig. 4. Stereolithographic models of the cranial bones of the Borremose woman.



Fig. 5. Facial reconstruction of the Borremose Woman (photo: N. Lynnerup).

The manual process of delineating and extracting the relevant items (tissues, organs, etc.) necessitates a certain anatomical knowledge, even more so as the bones are often bent and deformed and organs are often shrunken. There is some room for subjectivity when performing segmentation. Along with the previously stated caveat on slice thickness (and indeed on the inherent properties of X-ray-based image acquisition), this means that CT scanning images and 3D renderings should not be viewed as a totally objective and 'true' representation of internal structures and tissues. Some pathological processes may be falsely ascribed to diagenetic processes, while some diagenetic processes may be misinterpreted as pathological processes [1].

Once tissues and organs have been segmented and visualized, they can then be measured and assessed morphologically.

Pathology and Pseudopathology

Our examinations using CT scanning of the bog bodies has meant that we were able to visualize otherwise hidden structures, and the editing after image acquisition further allowed us to visualize demineralized bone. This in turn allowed us to reappraise some of the previously described lesions. Acid bog diagenetics mean that

bone will be demineralized, become pliable and, upon subsequent excavation and drying out, also shrink and warp. This means that, under these conditions, etiological attribution of pathology and trauma lack certainty.

Paleopathological finds are overall sparse, especially in non-mineralized tissues. And for those pathological conditions identified, it may perhaps be discussed to what extent minor pathologies have a major impact on biocultural understanding; trauma, however, is clearly indicative of an active, maybe even sacrificial, cultural setting. The Tyrolian Iceman had an arrow point lodged in his shoulder [32], while nearly all the bog bodies have definite signs of having been put to death [38].

Attempts to establish guidelines for segmenting images, producing 3D visualizations, and to address taphonomic influences as well as observer error is underway [Rühli, personal communication].

Conclusion

The methods of CT scanning and subsequent 3D visualization are powerful analytical tools for paleopathological and physical anthropological analyses of mummies and bog bodies. The technique allows the visualization of internal structures, especially bone and teeth. However, post-processing is often necessary to extract

the full information from the CT data. This is especially the case with bog bodies, where there is much taphonomic alteration of the skeletal structures. We have CT scanned several Danish bog bodies and, based on our findings, we feel that some lesions, previously claimed to be signs of perimortem trauma, may have to be reevaluated. Due to the sometimes extreme postmortem diagenetic influences on the bog bodies, it may be impossible ever to be certain on the exact nature of the observed lesions.

Finally, we wish to draw attention to the fact that CT scanning may not only be a valuable analytical tool, but also an extraordinarily precise tool for documenting bog bodies and mummies. The CT-scanning process generates data, literally millimeter by millimeter and inside out, in a digital format that may be accessed and shared with other scientists or museums. Our cooperation with Argentine scientists in the investigation of the Mount Llullaillaco Mummies is an example of such a data shar-

ing. The CT-scanning data may also be important in terms of future assessments of the preservational status of the bog bodies. Using so-called stereolithography, it is possible to produce 1:1 models of CT-scanned structures directly from the computer visualizations [30, 40, 41], detailing structures at a 1-mm resolution (fig. 4). This has some very evident uses for exhibits, and has been used as basis for facial reconstruction of mummies and bog bodies (fig. 5). Aside from advances in resolution and faster CT scanners, future prospects will probably include more CT-scanned bog bodies and mummies that will lead to better comparative studies. These can be expected to result in a better understanding of mummification, taphonomical changes, pseudopathologies, and the nature of observed lesions and tissue preservation. In this respect, the use of CT scanning in mummy studies as a 'screening tool' for locating pathological changes for subsequent precise sampling or for guiding endoscopic procedures will probably become more common.

References

- 1 Lynnerup N: Mummies. *Am J Phys Anthropol* 2007(suppl 45):162-190.
- 2 David AR, Tapp E: Evidence Embalmed. Manchester, Manchester University Press, 1984.
- 3 Cockburn A, Cockburn E, Reyman TA: Mummies, Disease and Ancient Cultures. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
- 4 Aufderheide A: The Scientific Study of Mummies. Cambridge, Cambridge University Press, 2003, p 608.
- 5 Lynnerup N: CT-scanning and 3D visualisation of mummies and bog bodies; in Pinhasi R, Mays S (eds): Advances in Human Paleopathology. Chichester, Wiley & Sons, 2008, pp 101-120.
- 6 Rühli FJ, von Waldburg H, Nilles-Vallespin S, Böni T, Speier P: Clinical magnetic resonance imaging of ancient dry human mummies without rehydration. *JAMA* 2007;298:2618-2620.
- 7 Koenig W: 14 Photographien mit Röntgen-Strahlen. Leipzig, Johann Ambrosius Barth Verlag, 1896.
- 8 Petrie WMF: Deshahesh 1897: Fifteenth Memoir of the Egyptian Exploration Fund. London, Egypt Exploration Fund, 1898.
- 9 Moodie RL: Roentgenologic Studies of Egyptian and Peruvian Mummies. Chicago, Field Museum of Chicago, 1931.
- 10 Harris JE, Weeks KR: X-Raying the Pharaohs. Chicago, Scribner & Sons, 1973.
- 11 Harris JE, Wente EF: An X-Ray Atlas of the Royal Mummies. Chicago, Chicago University Press, 1980.
- 12 Notman DNH, Anderson L, Beattie OB, Amy R: Arctic palaeoradiology: portable radiographic examination of two frozen sailors from the Franklin Expedition (1845-1848). *Am J Roentgenol* 1987;149:347-350.
- 13 Notman DNH, Beattie OB: The paleoimaging and forensic anthropology of frozen sailors from the Franklin Arctic expedition mass disaster (1845-1848): a detailed presentation of two radiological surveys; in Spindler K, Wilfing H, Rastbichler-Zissering E, zur Nedden D, Nothdurfter H (eds): Human Mummies: A Global Survey of their Status and the Technique of Conservation New York, Springer, 1995, pp 3-8.
- 14 Fawcitt RA, Jarvis H, Isherwood I: X-raying the Manchester mummies; in David R, Tapp E (eds): Evidence Embalmed. Modern Medicine and the Mummies of Ancient Egypt. Manchester, Manchester University Press, 1984.
- 15 Smith GE: The Royal Mummies. Cairo, Catalogue General des Antiquités Égyptiennes de Musée du Cairo, 1912.
- 16 Neave RAH: The reconstruction of skulls for facial reconstruction using radiographic techniques; in David AR (ed): Science in Egyptology. Manchester, Manchester University Press, 1979.
- 17 Bloomfield JA: Radiology of Egyptian mummy. *Australas Radiol* 1985;29:64-66.
- 18 Brothwell D, Sandison AT: Diseases in Antiquity. Springfield, Thomas, 1967.
- 19 Hsieh J: Computed Tomography. Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances. Bellingham, SPIE Press, 2002.
- 20 Harwood-Nash DC: Computed tomography of ancient Egyptian mummies. *J Comput Assist Tomogr* 1979;3:768-773.
- 21 Lewin PK, Harwood-Nash DC: Computerized axial tomography in medical archaeology. *Paleopathol Newsl* 1977;17:8-9.
- 22 Marx M, D'Auria SH: CT examination of eleven Egyptian mummies. *Radiographics* 1986;6:321-330.
- 23 Marx M, D'Auria SH: Three-dimensional CT reconstructions of an ancient human Egyptian mummy. *Am J Radiol* 1988;150:147-149.
- 24 Pickering RB, Conces JE, Braunstein EM, Yurco F: Three-dimensional computed tomography of the mummy Wenuhotep. *Am J Phys Anthropol* 1990;83:49-55.
- 25 Zollikofer CPE, Ponce de León MS: Virtual Reconstruction. A Primer in Computer-Assisted Paleontology and Biomedicine. New York, Wiley & Sons, 2005.
- 26 Hoffman H, Torres WF, Ernst RD: Paleoradiology: advanced CT in the evaluation of nine Egyptian mummies. *Radiographics* 2002;22:377-385.
- 27 Previgliano CH, Ceruti C, Reinhard J, Arazo FA, Diez JG: Radiologic evaluation of the Llullaillaco mummies. *Am J Radiol* 2003;181:1473-1479.
- 28 Vahay T, Brown D: Comely Wenuhotep: computed tomography of an Egyptian mummy. *J Comput Assist Tomogr* 1984;8:992-997.

- 29 Melcher AH, Holowka S, Pharoah M, Lewin PK: Non-invasive computed tomography and three-dimensional reconstruction of the dentition of a 2,800-year-old Egyptian mummy exhibiting extensive disease. *Am J Phys Anthropol* 1997;103:329-340.
- 30 Nerlich AG, Zink A, Szeimies U, Hagedorn HG: Ancient Egyptian prosthesis of the big toe. *Lancet* 2000;356:2176-2179.
- 31 zur Nedden D, Wicke K: Der Eisman aus der Sicht der radiologischen und computertomographischen Daten; in Höpfl F, Platzer W, Spindler K (eds): *Der Mann in Eis*. Innsbruck, Innsbruck University, 1992, pp 131-148.
- 32 Gostner P, Egarter Vigl E: Report of radiological-forensic findings on the Iceman. *J Archaeol Sci* 2002;29:323-326.
- 33 Ciranni R, Garbini F, Neri E, Melai L, Giusti L, Fornaciari G: The 'Braids Lady' of Arezzo: a case of rheumatoid arthritis in a 16th century mummy. *Clin Exp Rheumatol* 2002;20:745-752.
- 34 Fornaciari G, Ciranni R, Ventura L: Paleoandrology and prostatic hyperplasia in Italian mummies (XV-XIX century). *Med Secoli* 2001;13:269-284.
- 35 Taconis WK, Maat GJR: Radiological findings in the human mummies and human heads; in Raven MJ, Taconis WK (eds): *Egyptian Mummies. Radiological Atlas of the Collections in the National Museum of Antiquities in Leiden*. Turnhout, Brepols, 2005.
- 36 Brothwell D, Liversage D, Gottlieb B: Radiographic and forensic aspects of the female Huldremose body. *J Dan Archaeol* 1990;9:157-178.
- 37 Rühli FJ, Hodler J, Böni T: CT-guided biopsy: a new diagnostic method for paleopathological research. *Am J Phys Anthropol* 2002;117:272-275.
- 38 van der Sanden W: *Through Nature to Eternity. The Bog People of Northwest Europe*. Assen, Drents Museum, 1996, p 200.
- 39 Asingh P, Lynnerup N: *Grauballe Man*. Århus, Århus University Press, 2007, p 351.
- 40 Hjalgrim H, Lynnerup N, Liversage M, Rosenkint A: Stereolithography: potential applications in anthropological studies. *Am J Phys Anthropol* 1995;97:329-333.
- 41 Cesarani F, Martina MC, Grilletto R, Boano R, Roveri AMD, Capussotto V, Giuliano A, Celia M, Gandini G: Facial reconstruction of a wrapped Egyptian mummy using MDCT. *Am J Radiol* 2004;183:755-758.