



Vlaanderen
is wetenschap



22_090_1
WL rapporten

Ontwikkeling circulaire bouwtechniek voor schaalmodellen (CIRCUS)

Eind rapport

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ontwikkeling circulaire bouwtechniek voor schaalmodellen (CIRCUS)

Eind rapport

Brouwers, B.; Wolput, B.; Peeters, P.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2025
D/2025/3241/144

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Brouwers, B.; Wolput, B.; Peeters, P. (2025). Ontwikkeling circulaire bouwtechniek voor schaalmodellen (CIRCUS) : Eind rapport. Versie 4.0. WL Rapporten, 22_090_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2025R22_090_1
Trefwoorden (3-5):	Bouwtechniek, Schaalmodel, Duurzaam, Circulair		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Schaalmodelproeven Hydraulica en sediment > Sediment > Sedimenttransport > Schaalmodelproeven Hydraulica en sediment > Sediment > Baggeren en storten > Schaalmodelproeven Hydraulica en sediment > Klimaatverandering > Golven > Schaalmodelproeven		
Tekst (p.):	23	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Brouwers, B.
------------	--------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Wolput, B. Peeters, P.	Getekend door:Wolput Ben Getekend op:2025-08-26 07:53:22 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed   Getekend door:Peeters Patrik Peter P Getekend op:2025-08-25 17:56:34 +02:00 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Brouwers, B.	Signed by:Brouwers Bart Ingrid J Signed at:2025-08-25 16:20:00 +02:00 Reason:Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Verantwoordelijke E&O:	Latte, J.	Getekend door:Jurgen Latte (Signature) Getekend op:2025-08-25 17:25:06 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Signed by:Bellafkih Abdelkarim Signed at:2025-08-26 13:52:46 +02:00 Reason:Ik keur dit document goed  

Abstract

Het Waterbouwkundig Laboratorium streeft naar een bredere inzet van schaalmodellen in wetenschappelijk onderzoek. De traditionele bouwtechnieken met steenachtige materialen zijn echter tijdrovend, kostbaar en inflexibel, wat de creatieve mogelijkheden beperkt en leidt tot aanzienlijke afvalstromen. In een eerder onderzoek werd de innovatieve CIRCUS-techniek ontwikkeld, waarbij schaalmodellen worden gefreesd uit een smeltbaar materiaal met een lage smelttemperatuur ($<80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dit biedt voordelen zoals hoge nauwkeurigheid, automatisering, herbruikbaarheid van het materiaal en flexibiliteit in aanpassingen. Dit project richtte zich op de verdere ontwikkeling en opschaling van de CIRCUS-techniek. Parafine wax (Basewax0597 van Paramelt) werd als meest geschikt materiaal geïdentificeerd. Een belangrijke uitdaging was het minimaliseren van kleefproblemen tijdens het frezen, wat werd opgelost met een platte frees. Hoewel significante vooruitgang is geboekt in de opschaling van het proces, is de CIRCUS-techniek nog niet volledig matuur. Dit rapport beschrijft de opgedane inzichten en verdere stappen naar een efficiëntere en duurzamere methode voor de bouw van schaalmodellen.

Inhoudstafel

Abstract	IV
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Polymeren	2
2.1 PTMEG 2000.....	2
2.1.1 Smelten	2
2.1.2 Stollen	3
2.1.3 Frezen	3
2.1.4 Beloopbaarheid	3
2.1.5 Ideeën voor verdere verwerking	3
2.2 CAPA6500.....	4
2.2.1 Smelten	4
3 Parafine wax (Basewax 0597).....	6
3.1 Smelten	6
3.1.1 Oven.....	6
3.1.2 Heat Gun	7
3.1.3 Infraroodlamp.....	7
3.1.4 Grootschalige smeltproeven.....	8
3.2 Uitharden	10
3.2.1 Bekisting met betonplex.....	10
3.2.2 EPDM rubber	11
3.3 Frezen.....	11
3.3.1 Algemeen frees proces en afvoer spanen	11
3.3.2 Nauwkeurigheid en efficiëntie.....	13
3.4 Mengen met zand	14
3.5 Optische metingen (FARO-arm)	16
3.6 Vormvastheid	16
3.6.1 Verzakking.....	16
3.6.2 Erosie door water	16
3.7 Snijden en zagen	18
3.8 Invloed op watereigenschappen.....	19

3.9	Conclusie	20
3.9.1	Geschiktheid van Basewax 0597.....	20
3.9.2	Strategieën voor de bouw van een groter schaalmodel met CIRCUS	20

Lijst van de figuren

Figuur 1 – bekisting met gesmolten PTMEG 2000 (kleurloos)	2
Figuur 2 – bekisting met gestolde PTMEG 2000 (witte kleur)	3
Figuur 3 – CAPA6500 in de oven na 1 u aan 75°C plus 1 u aan 90 °C. Enkel op de bovenste korrels was enig verlies van kleur, als teken van smelten, zichtbaar.	4
Figuur 4 – Gesmolten CAPA6500. De ingesloten luchtbellen zijn duidelijk zichtbaar.	5
Figuur 5 – Foto van de wax in de bekisting na 4 uur in de oven aan 100 °C. Nog niet gesmolten wax (wit van kleur) drijft bovenop de reeds gesmolten wax (kleurloos). Het volume wax was grotendeels gesmolten.	6
Figuur 6 – Smelten van wax met een heat gun. Gesmolten wax stolt direct nadat het de hete lucht straal heeft verlaten. Resultaat is zoals een bevroren fontein van water (niet goed te zien op de foto).	7
Figuur 7 – Opstelling met wax in vaste vorm onder een IR lamp.	8
Figuur 8 – SH200 smeltketel van Sellacq Holland. Merk de vlotte (waterachtige) uitstroom van vloeibare wax op.	9
Figuur 9 – Bekisting van +/- 2m x 1m x 0.2m gevuld met uitgeharde wax. De wax werd gestort vanuit de smeltketel (rechts).	10
Figuur 10 – Experiment met EPDM als bekistingsmateriaal. De foto links toont aan dat met EPDM een meer willekeurige vorm gegeven kan worden aan de wax. De foto rechts toont bijkomend aan dat de EPDM eenvoudig van de wax gepeld kan worden.	11
Figuur 11 – Verschillende pogingen om een grindbodem te frezen uit de wax. De chronologie van de pogingen wordt aangeduid met de nummering.	12
Figuur 12 – Opzetstuk op met borstel en aansluiting voor stofzuiger	13
Figuur 13 – Scan van een gefreesd model. Dit model werd deels gefreesd met een verticale resolutie van 3 mm (links van rode streepjeslijn) en deels aan een verticale resolutie van 1 mm (rechts van de rode streepjeslijn). De referentie van de scan is het digitale model.	14
Figuur 14 – Twee gegoten waxblokjes. Aan het links blokje werd zand toegevoegd tijdens het gieten van de wax. In vloeibare wax bezinkt het zand vlot en wordt een zandlaag gevormd op de bodem (aangeduid met kader in streepjeslijn). De gemiddelde dichtheid van het links blokje werd op die manier verhoogd tot 1100 kg/m ³ . Het rechtse blokje bestaat uit puur wax en heeft een dichtheid van 960 kg/m ³	15
Figuur 15 – Een zand talud verzadigd met wax.	15
Figuur 16 – Drempel uit wax vast gemonteerd op de bodem van een stroomgoot. De drempel werd langdurig blootgesteld aan een debiet van 20 l/s.	17
Figuur 17 – Reliëf op het vrije oppervlak van de wax ten gevolge van het uithardingsproces.	17
Figuur 18 – Hot wire cutting van een wax blokje.	18
Figuur 19 – 2D Voorbeeld van stortstrategie ter minimalisatie van het latere freeswerk. Het bruine stelt een doorsnede van een schaalmodel voor. De zwarte kaders zijn een voorstel van de te storten volumes wax.	21
Figuur 20 – Ondervulling van de wax volumes geïllustreerd met de transparante licht grijze kaders	22

1 Inleiding

Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft de ambitie om blijvend schaalmodellen in te zetten voor toekomstig onderzoek. Om het gebruik van morfologische schaalmodellen aantrekkelijker te maken moet de bouw ervan echter sneller en goedkoper en flexibeler kunnen gebeuren. Vandaag worden dergelijke schaalmodellen veelal gemaakt uit steenachtige materialen, wat eerder traag en duur is. Bovendien zijn steenachtige materialen geenszins flexibel in gebruik. Dit beknopt de creativiteit in het wetenschappelijk onderzoek en zorgt bovendien voor een grote afvalstroom na afloop van het project.

Tijdens een voorgaand O&O project (WL_21_100_POC_Scheldemodel) werd een nieuwe bouwtechniek bedacht en uitgewerkt waarmee eerder vernoemde nadelen van de klassieke bouw van een schaalmodel kunnen worden verholpen. Hierbij wordt een schaalmodel gefreesd uit een materiaal met een relatief lage smelttemperatuur ($< 80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Door het frezen wordt een hoge nauwkeurigheid van het schaalmodel gewaarborgd en kan de bouw ervan grotendeels worden geautomatiseerd. Dit laatste zal de kost en snelheid van de bouw van het schaalmodel ten goede komen. De smeltbaarheid van het materiaal geeft flexibiliteit voor aanpassingen tijdens het onderzoek en laat vooral toe om al het materiaal te recupereren voor gebruik ter realisatie van een volgend schaalmodel.

Deze techniek wordt ook wel aangeduid met het acroniem “CIRCUS”. CIRCUS staat voor Circulaire en Innovatieve bouwtechniek voor schaalmodellen, waarmee de circulariteit en duurzaamheidsaspecten van de techniek worden benadrukt.

Dit project heeft tot doel om de CIRCUS bouwtechniek verder te ontwikkelen tot een praktisch inzetbare techniek. Dit gebeurt door eerst een materiaal te vinden dat hiervoor best geschikt is. Vervolgens worden de verschillende stappen van het proces van de CIRCUS techniek verfijnd naar de eigenschappen van het gekozen materiaal. Finaal wordt er gekeken hoe de opschaling optimaal kan gebeuren om de bouw van grotere schaalmodellen te kunnen verwezenlijken met de CIRCUS techniek. In dit rapport worden de ervaringen en bevindingen beschreven die werden opgedaan gedurende dit traject.

Bij en eerste zoektocht naar geschikte materialen werd vooral gekeken naar polymeren. Uiteindelijk werden twee polymeren (PTMEG2000 en CAPA 6500) fysiek uitgetest, waarbij PTMEG2000 als meest geschikt bevonden. De bevindingen van dit onderzoek worden beschreven in Hoofdstuk 2.

Gezien de beperkte kennis binnen het WL in het domein van materiaalkunde werd externe hulp ingeschakeld. Met de hulp van PIO werd beroep gedaan op de materiaalkundige expertise van SIRRIS. Met hun hulp werd een parafine wax (Basewax0597) bevonden als meest geschikt materiaal. Aanvullende testen en de verdere ontwikkeling van de CIRCUS techniek gebeurde dan ook met gebruik van Basewax0597. De bevindingen van deze testen zijn terug te vinden onder Hoofdstuk 3 van dit rapport. Het rapport van SIRRIS is terug te vinden op de projectsite, zie [WBL-report231006_final.pdf](#).

Hoofdstuk 4 geeft finaal een overzicht van de conclusies en aanbevelingen voor een vervolg traject.

2 Polymeren

2.1 PTMEG 2000

PTMEG2000 is een polymeer dat voornamelijk gebruikt wordt voor de productie van Spandex (kledingstof). De gecontacteerde Leverancier is Will & Co uit Nederland. Het polymeer wordt gemaakt in Vietnam. Het wordt naar Europa per container getransporteerd in korrelvorm (pellets – dia 1 – 2 mm) naar Europa. Het kan eventueel gesmolten worden voor transport en levering met tankwagens.

Aankoopprijs is 6.95 EUR/kg (dd 07/2022).

2.1.1 Smelten

De smeltemperatuur van PTMEG 2000 is moeilijk exact te bepalen was. Op basis van observaties wordt geschat dat deze tussen de 30°C en 35°C ligt. Door de lage thermische geleidbaarheid van het materiaal duurt het relatief lang voordat de kern de gewenste temperatuur bereikt. Dit werd duidelijk bij het gebruik van een au bain-marie methode, waarbij de warmte slechts langzaam in het materiaal doordrong.

Bij gebruik van een heat gun bleek dat de bovenste laag goed smelt, mits er voldoende luchtverplaatsing aanwezig is. Het gesmolten materiaal moet actief worden weggeblazen om nieuw materiaal bloot te stellen aan de hittebron. Hoe hoger de temperatuur, hoe sneller het smelten verloopt.



Figuur 1 – bekisting met gesmolten PTMEG 2000 (kleurloos)

2.1.2 Stollen

Na één zomerse dag met een kamertemperatuur van ongeveer 23°C, was de bovenste laag nog steeds vloeibaar. Na twee dagen was deze nog steeds niet volledig gestold, wat aangeeft dat de stollen eerder een kwestie is van tijd dan van temperatuur. Dit bevestigt de slechte thermische geleidbaarheid van het materiaal.



Figuur 2 – bekisting met gestolde PTMEG 2000 (witte kleur)

2.1.3 Frezen

Door de lage smettemperatuur van PTMEG 2000 smelt het materiaal tijdens het freesproces. Hierdoor blijft verspaand materiaal kleven aan het restmateriaal. Dit is ongewenst voor een hoge nauwkeurigheid van de gefreesde vorm. Het smelten kon worden geminimaliseerd door een lage freessnelheid aan te houden en door koeling met water in plaats van door gecompriëerde lucht. Er blijft echter altijd een minimale hoeveelheid spanen kleven. Deze kunnen wel gemakkelijk verwijderd worden met een vochtige doek, eventueel bevochtigd met alcohol.

2.1.4 Beloopbaarheid

De beloopbaarheid werd getest door met een halve werkschoen, met vol gewicht te steunen op een testmodel. Dit werd gedaan bij verschillende temperaturen. Tot een temperatuur van 27 °C was er geen vervorming zichtbaar. Vanaf 30°C was er wel vervorming. Deze werd enkel veroorzaakt door de belasting en niet door het eigen gewicht van het materiaal.

2.1.5 Ideeën voor verdere verwerking

Om het materiaal efficiënter te gebruiken worden volgende ideeën voorgesteld:

- mengen met een zwaarder en goedkoper vulmateriaal (bvb zand) om de hoeveelheid PTMEG2000 te minimaliseren.
- Het versnijden van een model in grote blokken door middel van een hotwire

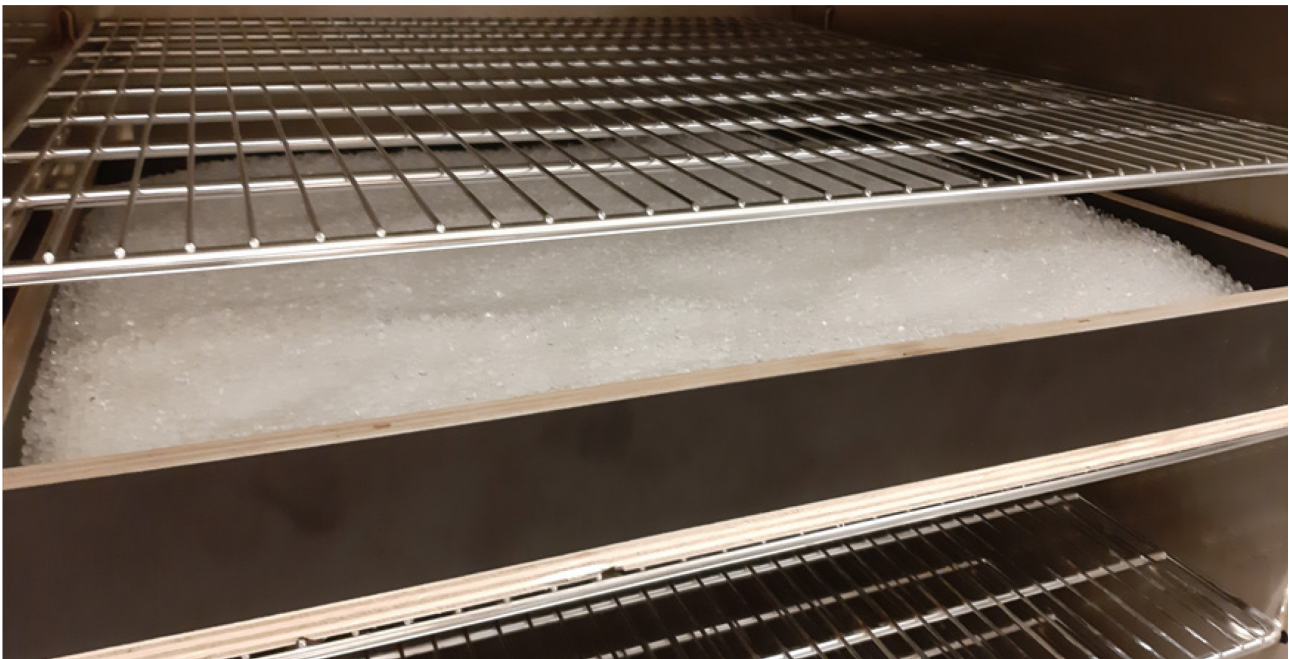
2.2 CAPA6500

CAPA6500 is een polymeer dat voornamelijk gebruikt wordt als lijm voor de plastic verpakking van voedingswaren. De gecontacteerde leverancier is Ingevity uit de UK. De levering gebeurt in korrels van +/- 5 mm diameter (beats).

Aankoopprijs is 6.90 EUR/kg (dd 05/2022).

2.2.1 Smelten

Het smelten van CAPA6500 met een heat gun bleek problematisch, omdat de korrelstructuur ervoor zorgde dat de korrels weg werden geblazen, zelfs bij de laagste ventilatorstand. Bovendien had het materiaal een zeer hoge viscositeit in gesmolten toestand. Bij smelting in een oven werd vastgesteld dat het materiaal na een uur op 75°C nog niet gesmolten was. Pas na een extra uur op 90°C begon de bovenste laag te smelten, en na twee uur op 105°C was het volledig gesmolten.



Figuur 3 – CAPA6500 in de oven na 1 u aan 75°C plus 1 u aan 90 °C. Enkel op de bovenste korrels was enig verlies van kleur, als teken van smelten, zichtbaar.

Een bijkomend probleem was dat er door de korrelstructuur veel luchtbellens in het materiaal ontstonden tijdens het smelten. Door de hoge viscositeit konden niet alle luchtbellens ontsnappen, wat resulteerde in blijvende holtes en bellens aan het oppervlak. Na afkoeling bleef het materiaal aanvankelijk transparant, maar het stelde snel en was binnen 24 uur volledig wit en uitgehard.

Er werd geen hechting aan de mal waargenomen, maar er was wel een duidelijke krimp zichtbaar: 2 mm op een lengte van 510 mm en 1.5 mm op een breedte van 400 mm, wat neerkomt op een krimpprocentage van ongeveer 3.8%.

Omwillen van deze negatieve ervaringen tijdens het smelten werd het gebruik van CAPA6500 niet verder onderzocht.



Figuur 4 – Gesmolten CAPA6500. De ingesloten luchtballen zijn duidelijk zichtbaar.

3 Parafine wax (Basewax 0597)

Basewax 0597 wordt voornamelijk gebruikt als glijmiddel voor het extruderen van metaal profielen. Levering is standaard in korrelvorm (pellets +/- 2 mm dia) in zakken van 25 kg. Optioneel kan de wax in vloeibare toestand geleverd worden met tankwagens.

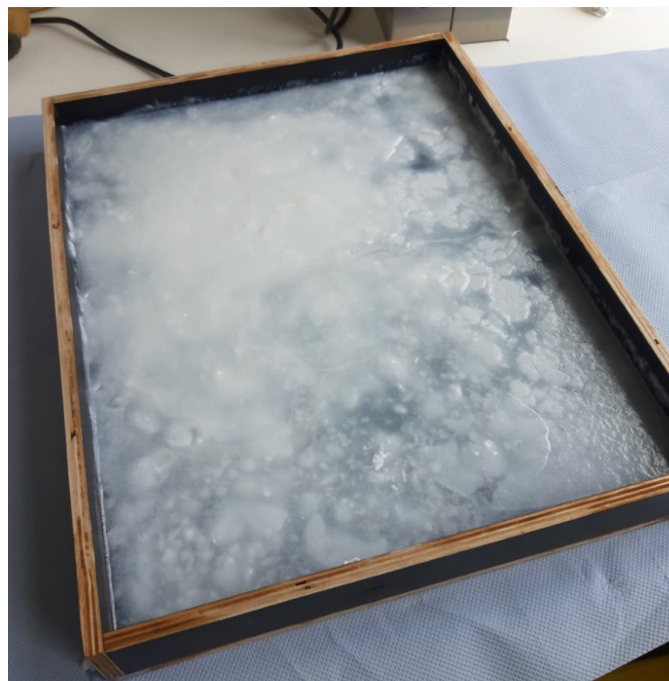
Aankoopkostprijs in korrelvorm is 4.95 EUR/kg (anno 12/2023)

3.1 Smelten

3.1.1 Oven

Een eerste poging om wax te smelten gebeurde in de oven, conform het smelten van PTMEG en CAPA6500 (zie secties 2.1.1 en 2.2.1). Na 4 uur bij een temperatuur van 100 °C was de wax grotendeels gesmolten. Enkele vaste brokken dreven nog rond in de voor de rest vloeibare wax (cf ijsbergen in zee). Zie Figuur 5.

Gemorste druppels stolden snel, maar bleven enige tijd zacht. Een opmerkelijke eigenschap van de wax was de zeer lage viscositeit in gesmolten toestand. Hierdoor druppelde de wax doorheen de naden van de bekisting.



Figuur 5 – Foto van de wax in de bekisting na 4 uur in de oven aan 100 °C. Nog niet gesmolten wax (wit van kleur) drijft bovenop de reeds gesmolten wax (kleurloos). Het volume wax was grotendeels gesmolten.

3.1.2 Heat Gun

Bij gebruik van een heat gun smolt het materiaal snel, maar stelde het ook direct. Dit gedrag was zeer vergelijkbaar met kaarsvet. De lage viscositeit en de kracht van de luchtblazer zorgde voor een vlotte afvoer van gesmolten wax. Niettemin, eens uit de warme lucht straal, stolt de wax te snel om een significante verplaatsing van materiaal (volume en afstand) toe te laten, zie Figuur 6.



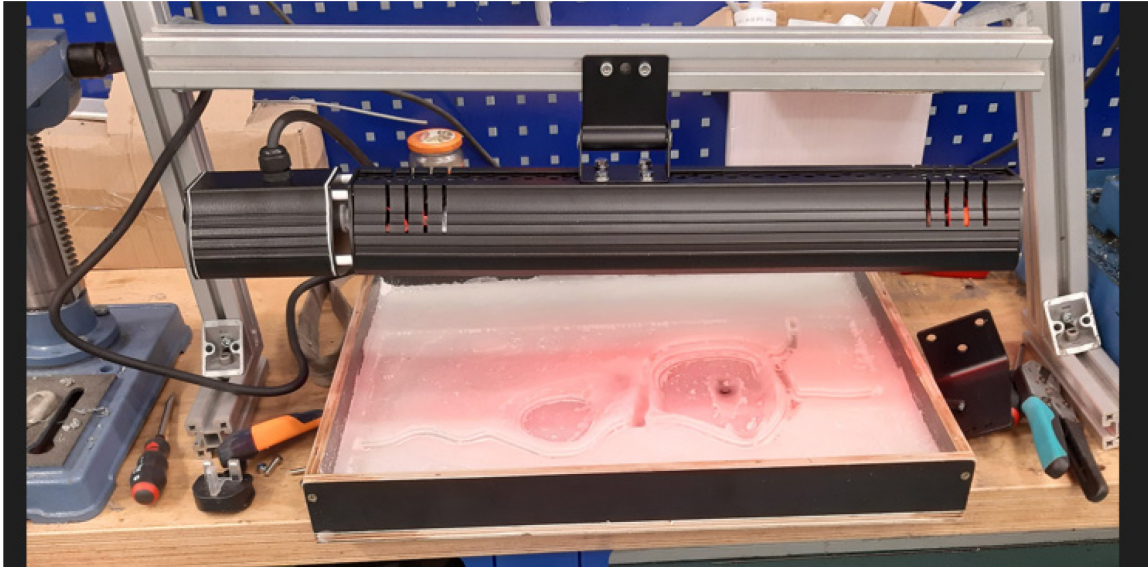
Figuur 6 – Smelten van wax met een heat gun. Gesmolten wax stolt direct nadat het de hete lucht straal heeft verlaten. Resultaat is zoals een bevroren fontein van water (niet goed te zien op de foto).

3.1.3 Infraroodlamp

Om een meer mobiele smeltopstelling te bekomen werd een bijkomende methode, met een infrarood lamp, uitgetest. Een infrarood lamp van 2000 W, instelbaar in 3 standen (1000 W, 1500 W en 2000 W) werd hiervoor gebruikt. De bekisting met wax werd onder de lamp geplaatst op een afstand van +/- 17 cm (zie Figuur 7). De IR lamp stond ingesteld op de laagste stand (1000 W). De wax was een reeds uitgefreesd model en bestond dus uit 1 blok (geen korrels).

Smelten met een IR lamp bleek een heel effectieve methode voor het smelten van de wax. De toplaag smolt vrijwel direct. Na 10 minuten werd een smeltlaag van ongeveer 5 mm waargenomen, en na 30 minuten was de gehele oppervlaktelaag gesmolten. Door de lage viscositeit en de betere warmteoverdracht nivelleerde de gesmolten wax zich over de gehele oppervlakte. Hoewel het betonplex van de bekisting tekenen van verbranding vertoonde, werd er geen beschadiging of verkoling van de wax vastgesteld. Er kwam wel een sterke geur van de opstelling. In een latere fase hebben we geleerd dat dit wel wijst op een zekere oververhitting.

Het smelten van de volledige wax hoeveelheid werd opzettelijk in fasen gedaan. Hierdoor kon de hechting van gesmolten wax op eerder gestolde wax geëvalueerd worden. Dit werd gedaan door een zijkant van de bekisting weg te nemen. De hechting bleek goed zichtbaar, maar niet voelbaar.



Figuur 7 – Opstelling met wax in vaste vorm onder een IR lamp.

3.1.4 Grootschalige smeltproeven

Infrarood lamp(en)

Met de infraroodlamp werd een poging gedaan om tot een semi-geautomatiseerde smeltopstelling te komen. Het concept bestond uit een glijbaan (aluminium hoekprofiel) opgesteld in een lichte helling. Aan de bovenzijde worden waxkorrels aangevoerd. Boven het Al-profiel stonden 2 infrarood lampen opgesteld. De wax korrels smelten door zowel de warmte rechtstreeks afkomstig van de lamp alsook van de warmte weerkaatst door het Al-profiel. Eens gesmolten stroomt de wax van het profiel in een bekisting.

Niet-gesmolten wax is lichter in densiteit dan gesmolten wax en drijft dus op de gesmolten wax (zie Figuur 4). Hierdoor werd niet-gesmolten wax soms te snel afgevoerd van het Al – profiel. Om dit te verwijderen werd er gaas gelegd op het Al-profiel. Gesmolten wax kan hier gemakkelijk langs passeren. Niet-gesmolten wax daarentegen blijft hier achter haken tot ook deze gesmolten is.

Het smeltproces verliep zeer efficiënt met deze opstelling. De theoretische hoeveelheid energie voor het smelten van Basewax 0597 is 225 kJ/kg, oftewel 0.0625 kWh/kg (= “Fusion Enthalpy”, zie rapport SIRRIS (1)). Met de beschreven opstelling werd 12.5 kg wax op 1 uur tijd gesmolten met een elektrisch vermogen van 1.5 kW. Dit komt neer op een rendement van 0.12 kWh/kg en dus een smeltefficiëntie van 52%. De bottleneck zat uiteindelijk in de aanvoer van de wax. Dit werd getracht met een conische doseersilo met een volume van 300 liter. Op deze manier moest de silo enkel tijdig gevuld worden voor een continue aanvoer van wax. Hierbij was het probleem dat de aanvoer regelmatig stopte door brugvorming van de waxkorrels aan de opening. De warmte komende van IR lampen had hier uiteindelijk ook zijn invloed op. Uiteindelijk werd een smeltproductie van 12.5 kg/uur behaald met één smeltopstelling.

Het smelten van een grotere hoeveelheid wax vereist dus meerdere smeltopstellingen. De opstellingen zijn goedkoop en gemakkelijk bij te maken. Het grootste probleem is echter indirect. Door de kleine aanvoer van wax is de totale warmte die mee gestort wordt klein. Dit maakt dat de wax vroegtijdig stolt en geen volledige nivellering van de wax toelaat.

Uiteindelijk werd geconcludeerd dat het moeilijk wordt om met deze opstelling een opschaling van het smelten van wax te verwezenlijken. De ervaringen met het smelten van wax door middel van een IR lamp blijft echter wel nuttig voor bijvoorbeeld lokale aanpassingen/herstellingen.

Smeltketel

Na het afstappen van een zelfbouw opstelling met IR lamp werd gekeken naar meer industriële smeltinstallaties. Courante smeltinstallatie, zoals bijvoorbeeld een frituurketel zijn geen optie omwille van de te hoge temperaturen. Die zouden de wax oververhitten en uiteindelijk verbranden. Dubbelwandige smeltketels uit de kaarsindustrie toonden wel veel potentieel.

Uiteindelijk werd een dergelijke smeltketel van 200 liter aangekocht bij Sellacq Holland (SH200 – zie Figuur 7). Deze ketel heeft een maximum instelbare temperatuur van 120 °C. Normaal worden deze ketels uitgevoerd met 2 verwarmingselementen. Omdat de Basewax0597 een hogere smelttemperatuur heeft dan courante waxen voor kaarsen werd een extra verwarmingselement geïnstalleerd in de ketel. Het smelten van een volledig gevulde ketel duurt ongeveer 16 uur. Door de veilige opstelling (CE gekeurd) kan het smeltproces 's nachts uitgevoerd worden, waardoor verlies in arbeidstijd geminimaliseerd kan worden. Door de isolatie van de ketel en de slechte warmtegeleiding van de wax kan de gesmolten wax ook zonder veel energie op temperatuur gehouden worden.

Om oververhitting aan de binnenwanden van de ketel te voorkomen, moet de temperatuur in eerste instantie ingesteld worden op 50-60 °C. Na +/- 90 minuten kan de temperatuur verhoogd worden tot 85-95 °C. Het smeltproces kan versneld worden door nog niet gesmolten wax geregeld onder te dompelen in de reeds gesmolten wax en door grote stukken wax op te breken (maximaliseren contactoppervlakte).



Figuur 8 – SH200 smeltketel van Sellacq Holland. Merk de vlotte (waterachtige) uitstroom van vloeibare wax op.

3.2 Uitharden

3.2.1 Bekisting met betonplex

De gesmolten wax werd steeds gestort in een bekisting. Deze werd gemaakt uit betonplex. De uitharding van Basewax 0597 gaat vrij snel (enkele uren). De wax heeft wel een zekere kleef op de betonplex. Door verwijdering van de zijwanden kan de waxblok nog relatief gemakkelijk los getrokken worden van de betonplex. Hierbij bleven er nooit restanten aan de betonplex kleven.

Het uitharden gaat wel gepaard met een zekere krimp. Bij de kleine bekisting (zie Figuur 4) werd dit niet opgemerkt. Wel bij de grotere bekisting van 2 m² (zie Figuur 8). Hierbij ontstond tijdens het uitharden een opening van 1 cm tot 2 cm tussen de wax en de zijwanden.

De krimp wordt voorlopig dan ook ingeschat als +/- 1 % van de dimensies van de waxblok.



Figuur 9 – Bekisting van +/- 2m x 1m x 0.2m gevuld met uitgeharde wax. De wax werd gestort vanuit de smeltketel (rechts)

3.2.2 EPDM rubber

Om meer flexibiliteit te geven aan de vorm van de mal/bekisting waarin de wax wordt gegoten en uithardt, werd een bijkomende test gedaan in EPDM rubber (zie Figuur 10). EPDM rubber wordt courant gebruikt als dakbedekking. Het is in grote rollen verkrijgbaar en relatief gemakkelijk te verlijmen aan elkaar of op andere materialen. Net zoals bij betonplex is er wel een zekere kleef na uitharding maar kan de EPDM ook weer relatief gemakkelijk verwijderd worden. Aangezien EPDM zelf flexibel is, kan dit er als het ware afgepeld worden (zie Figuur 10).



Figuur 10 – Experiment met EPDM als bekistingsmateriaal. De foto links toont aan dat met EPDM een meer willekeurige vorm gegeven kan worden aan de wax. De foto rechts toont bijkomend aan dat de EPDM eenvoudig van de wax gepeld kan worden.

3.3 Frezen

3.3.1 Algemeen frees proces en afvoer spanen

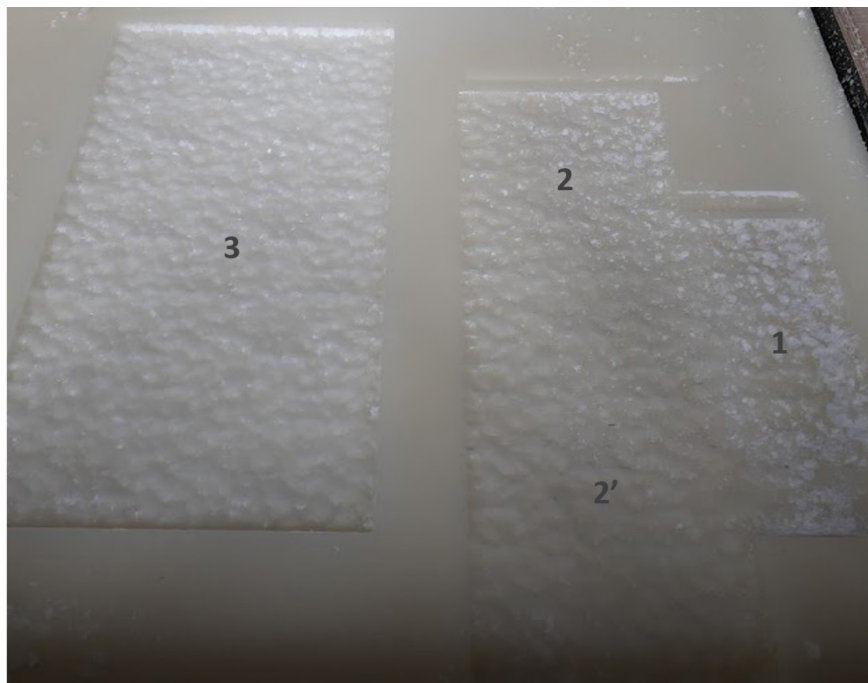
Basewax 0597 is goed te verspanen en dus freesbaar. De spanen zijn minder kleverig dan bij het frezen van PTMEG (zie 2.1.3). Niettemin bleef ook hier een ongewenst grote hoeveelheid van de spanen kleven (zie Figuur 11 – poging 1). Directe verwijdering van de spanen en koeling bleek noodzakelijk om kleef te voorkomen.

De keuze van de frees bleek snel cruciaal in deze. Bij gebruik van een rechte spiebaanfrees is de kleef van de spanen veel minder dan bij gebruik van een bolfrees. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat een bolfrees voornamelijk snijdt met het midden van de frees, waardoor de spanen minder snel worden afgevoerd en meer opwarmen. Bij een spiebaanfrees gebeurt het meeste snijden met de zijkanten, waardoor de spanen direct wegvliegen en minder kans hebben om aan het oppervlak te blijven kleven.

Initieel werd gedacht om de spanen na het frezen te verwijderen door deze weg te borstelen of op te zuigen. Dit werkt op zich goed, maar vraagt ongewenste extra arbeid. Bij de latere aankoop van de freesmachine werd dan ook een opzetstuk met borstel en stofzuiger besteld. De borstel dient voornamelijk om de spanen binnen de borstels te houden zodat deze allemaal opgezogen worden tijdens het frezen. Dit geeft reeds een significante verbetering (zie Figuur 9 – poging 2).

Herhaling van de finiseer-pas, zoals toegepast bij SIRRIS, resulteerde in een iets netter oppervlak, waarbij minder restmateriaal aan het oppervlak bleef plakken. Bij frezen in diepe groeven bleven de spanen echter alsnog kleven, omdat ze niet volledig konden worden afgevoerd (zie Figuur 9 – poging 2').

De focus verschoof daarom naar koelingstechnieken om de temperatuur van de spanen zo laag mogelijk te houden. Er werd geëxperimenteerd met perslucht, nevel, water en CO₂. Koeling met CO₂ was zeer succesvol. Er bleven zo goed als geen spanen meer kleven, waardoor er geen extra finiseer-pas meer nodig was. Met een bolfrees kon de hoogste nauwkeurigheid worden bereikt, wat cruciaal is voor toepassingen zoals het frezen van een puntenwolk of een mesh-model. Voor minder kritische toepassingen, waarbij een lagere resolutie (1-5 mm) volstaat, werd vastgesteld dat een vlakke frees zonder tweede passage voldoende nauwkeurigheid bood en een hoger rendement opleverde.



Figuur 11 – Verschillende pogingen om een grindbodem te frezen uit de wax.
De chronologie van de pogingen wordt aangeduid met de nummering.



Figuur 12 – Opzetstuk op met borstel en aansluiting voor stofzuiger

Tests uitgevoerd door de leveranciers van freesmachine zoals Sorotec en CNC-Step bevestigden de invloed van freessnelheden en koeling op de kwaliteit van het freeswerk. Bij gebruik van een ballnose endmill met verschillende feeds en toerentallen bleven steeds spanen kleven op het oppervlak. Koeling door toevoeging van een minimumhoeveelheid olie (5 ml/h) voorkwam dit volledig. Koeling met water gaf ook reeds een verbetering. Beide zijn echter geen goede oplossingen voor de uiteindelijke toepassing van een schaalmodel.

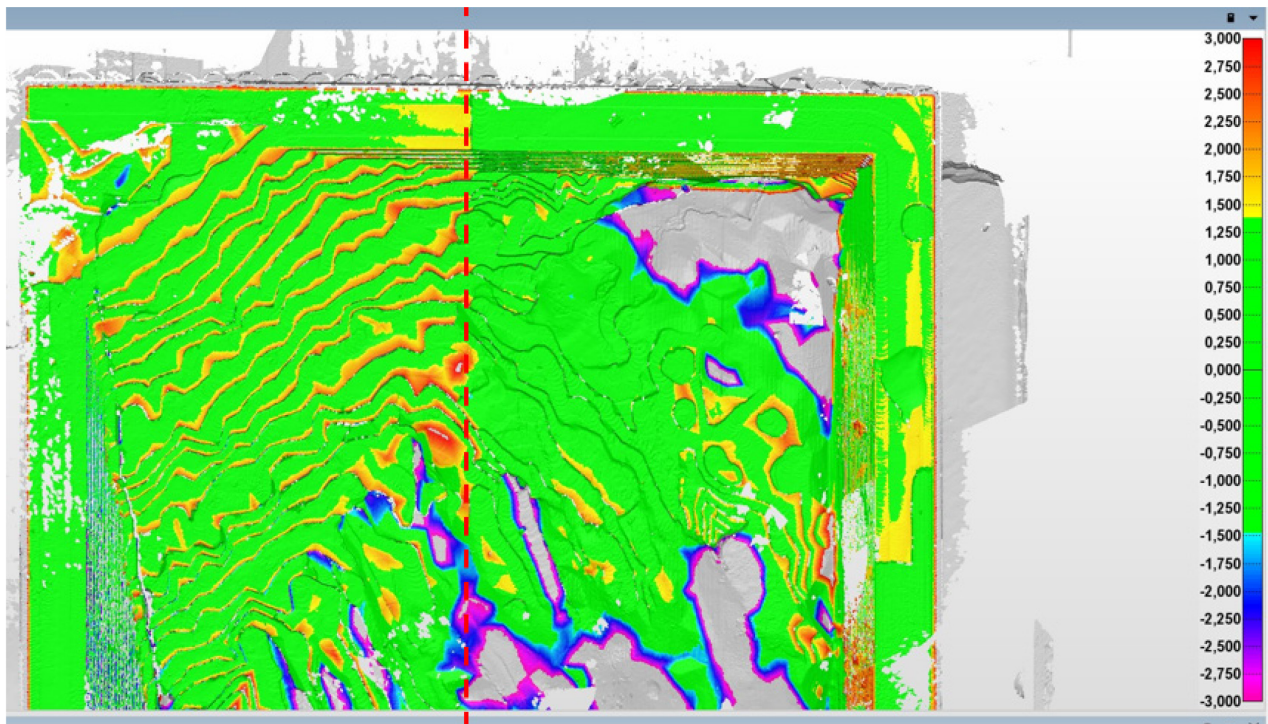
3.3.2 Nauwkeurigheid en efficiëntie

Met een bolfrees kan gefreesd worden aan de allerhoogste nauwkeurigheid (= puntenwolk van 3d model). Dit wordt best wel voorafgegaan door een ruim pas met een vlakke spiebaanfrees om snel grote hoeveelheden wax weg te frezen. Vervolgens kan het model verder afgewerkt worden met een bolfrees. Frezen met een bolfrees zorgt echter voor kleeft van de spanen. Een extra finiseer-pas (2de passage met bolfrees) is dus nodig om deze spanen alsnog te verwijderen. Die extra finiseer-pas is uiteraard nefast voor de productie capaciteit van het frezen.

Frezen met een vlakke spiebaanfrees maakt de herhaling van de finiseer-pas overbodig. Bovendien moet er ook niet gewisseld worden tussen verschillende frezen. Alles bij elkaar is het frezen met een vlakke spiebaanfrees dus veel efficiënter. Hierbij is er tevens flexibiliteit in de op te leveren nauwkeurigheid. De verticale resolutie (trapjes) kan immers zelf bepaald worden.

Als test werd eenzelfde model eerst gefreesd aan de hoogste nauwkeurigheid met een bolfrees en vervolgens met een rechte spiebaanfrees aan een verticale resolutie van 1 mm. Beide modellen werden gescand, waarbij bleek dat de nauwkeurigheid nagenoeg hetzelfde bleek te zijn. Figuur 10 geeft de scans van een model met verschillende verticale resoluties gefreesd werd, waaronder 1 mm. De aangegeven afwijking is ten opzichte van het digitale model.

Frezen van de wax dient dus enkel te gebeuren met een vlakke spiebaanfrees! Hierdoor is koeling overbodig en kan het hoogste rendement behaald worden zonder in te boeten in nauwkeurigheid. Uiteraard vraagt een hogere nauwkeurigheid (hoge verticale resolutie) wel meer tijd dan een lagere nauwkeurigheid (lage verticale resolutie).



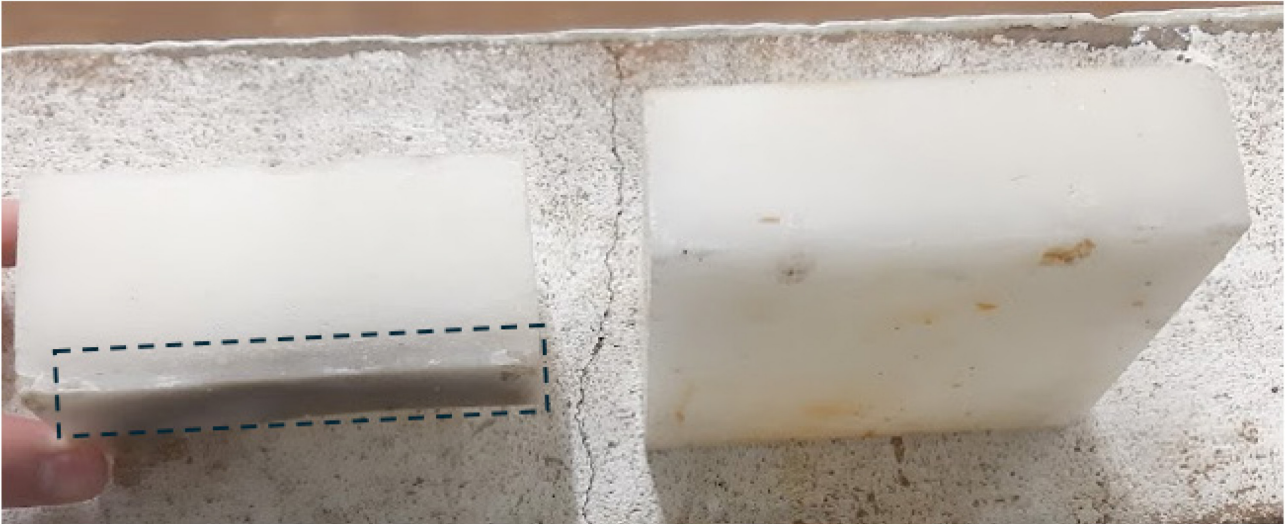
Figuur 13 – Scan van een gefreesd model. Dit model werd deels gefreesd met een verticale resolutie van 3 mm (links van rode streepjeslijn) en deels aan een verticale resolutie van 1 mm (rechts van de rode streepjeslijn). De referentie van de scan is het digitale model.

Een eventuele verdere optimalisatie van het frees proces zit in het verstijven van de freesmachine. Dit zou grotere freesdieptes toelaten en het aantal freespassages dus verminderen. Tijdens de experimenten van dit project was de maximale aanzetdiepte 15 mm. Bij grotere dieptes begon de freeskop te trillen, waardoor de nauwkeurigheid niet meer gegarandeerd kan worden. Dit is tevens nefast voor de werking van de freesmachine.

3.4 Mengen met zand

Het mengen met zand heeft twee mogelijke functies. Ten eerste kan het zand dienen als een goedkoop vulmiddel waardoor de hoeveelheid wax verminderd kan worden. Ten tweede kan hiermee de gemiddelde dichtheid van een blok wax verhoogd worden. Pure wax heeft een dichtheid van +/- 960 kg/m³ en drijft dus in water. Door toevoeging van zand kan een hogere dichtheid behaald worden waardoor een blok wax kan blijven staan in water. Dit is nodig indien we de CIRCUS techniek willen toepassen in installaties waarbij de wax volledig omringd zal zijn door water, zoals bijvoorbeeld in golfinstallaties.

Een vereiste is wel dat het zand zich niet mengt met te frezen wax. Zand is immers zeer abrasief en zal de freeskop sterk afslijten. Door de lage dichtheid en hoge viscositeit van gesmolten wax zakt het zand echter snel naar de onderste laag wax (zie Figuur 13 en Figuur 17). Op deze manier wordt een onderste zandlaag gevormd die volledig verzadigd is met wax. De combinatie van wax en zand werkt dus perfect voor eventuele modellen in een golfinstallatie.



Figuur 14 – Twee gegoten waxblokjes. Aan het links blokje werd zand toegevoegd tijdens het gieten van de wax.
In vloeibare wax bezinkt het zand vlot en wordt een zandlaag gevormd op de bodem (aangeduid met kader in streepjeslijn).
De gemiddelde dichtheid van het links blokje werd op die manier verhoogd tot 1100 kg/m^3 .
Het rechtse blokje bestaat uit puur wax en heeft een dichtheid van 960 kg/m^3 .

Een tweede test werd gedaan waarbij gesmolten wax toegevoegd werd een droog zand. Dit kan nuttig zijn om bvb taluds vormvast uit te voeren (cf. chape). Om dit succesvol uit te voeren werd duidelijk dat het zand eerst voldoende opgewarmd moet worden om de gesmolten wax in de zandlaag te kunnen laten dringen. Na afkoeling volgt het geheel een zeer slijt – en vormvast geheel (zie Figuur 12). Indien de temperatuur van het zand te laag is, stroomt de wax gewoon over het zand.



Figuur 15 – Een zand talud verzadigd met wax.

Indien het mengen met zand overwogen wordt moet er wel van uit gegaan worden dat het zand en de wax niet meer gescheiden kunnen worden. In principe moet dit mogelijk zijn door een dergelijk stuk terug te smelten. Segregatie zal automatisch terug optreden en de wax zal deels gerecupereerd kunnen worden. Het zand, en de wax welke zich in de poriën van de zandlaag bevindt zal op deze manier echter niet gescheiden kunnen worden.

3.5 Optische metingen (FARO-arm)

Zoals eerder vermeld in 3.3.2 werden scans gemaakt van uit wax gefreesde modellen. Deze scans werden gemaakt met een FARO-arm en is dus gebaseerd op reflectie van licht (laser). Gezien de transparantie in gesmolten toestand werd afgetoetst of de laser niet penetreert in de wax. Dit zou immers een offset geven op scans. In geval van een variabele offset kan gesteld worden dat een optische scan van een model uit wax niet mogelijk is. Voor deze test werd een blokje gescand met de FARO-arm en tevens opgemeten met een schuifmaat. De bekomen afmetingen kwamen zo goed als perfect overeen. Een optische scan van een waxmodel is dus zeker mogelijk.

3.6 Vormvastheid

3.6.1 Verzakking

Volgens collega's van UGent worden/werden in een nautisch onderzoekscentrum in Japan scheepsmodellen voor gebruik in een sleeptank vervaardigd uit wax. Deze modellen vertoonden wel vervorming (inzakking) na verloop van tijd. De vraag werd dus gesteld of dit ook te verwachten valt met de Basewax 0597. Hiervoor werden twee scans gemaakt van een gefreesd waxmodel, met een tussenperiode van 2 maanden. Deze scans toonden geen verschillen aan ten gevolge van soortgelijke verzakkingen.

3.6.2 Erosie door water

Aangezien schaalmodellen langdurig en frequent worden blootgesteld aan stromend water, rees de vraag of er hierdoor erosie van de wax zal optreden.

Om dit te testen werd een drempel gemaakt uit wax gemonteerd op de bodem van een stroomgoot (Overloepdijk installatie in Hal 4 van het Waterbouwkundig Laboratorium). Vervolgens werd het blokje enkele uren blootgesteld aan een debiet van 20 l/s (zie Figuur 13). Zoals te zien op Figuur 13 was de impact van het water op de drempel significant en veel meer dan opgelegd zal worden in een stromingsmodel. Initieel werd getracht om erosie vast te stellen door meting van de dimensies van de drempel. Dit bracht geen erosie aan het licht. Visuele inspectie van de drempel bevestigde dit. Tijdens het uithardingsproces vormt er zich een reliëf op het vrije oppervlak van de wax. Ook hier was geen erosie zichtbaar na de blootstelling in de stroomgoot (zie Figuur 14).



Figuur 16 – Drempel uit wax vast gemonteerd op de bodem van een stroomgoot.
De drempel werd langdurig blootgesteld aan een debiet van 20 l/s.

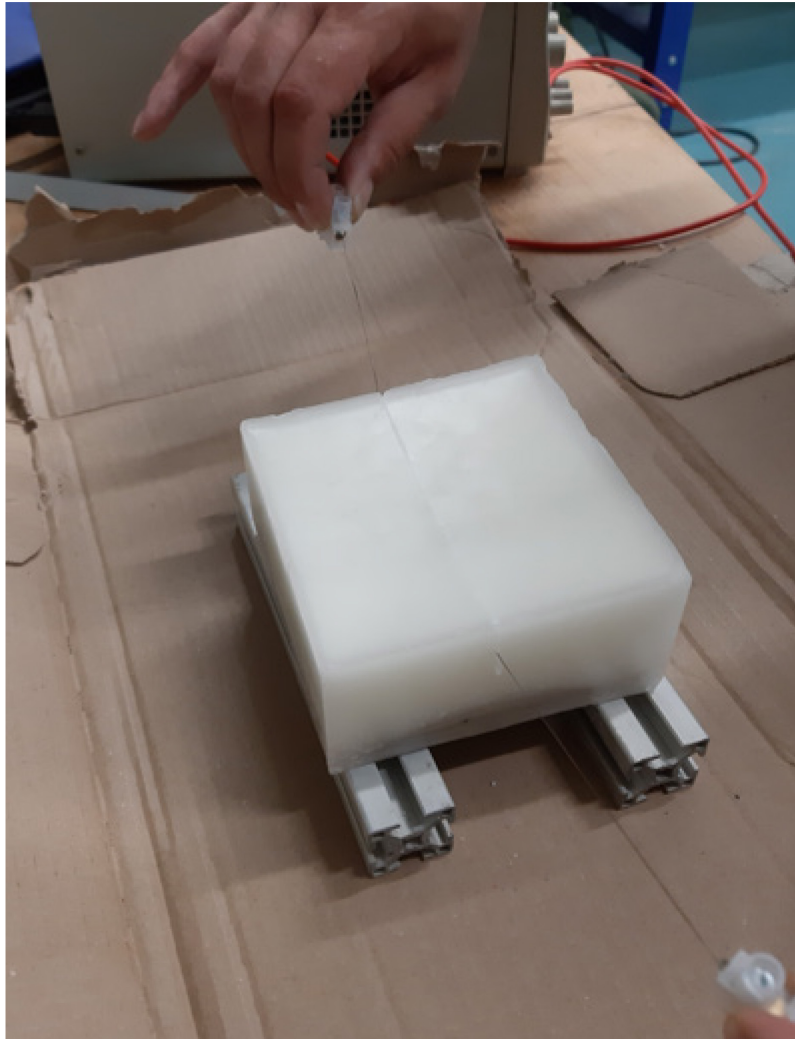


Figuur 17 – Reliëf op het vrije oppervlak van de wax ten gevolge van het uithardingsproces.

3.7 Snijden en zagen

De beste manier om wax blokken te verzagen is met een gewone cirkelzaag. Hiermee kunnen nette sneden worden gemaakt zonder dat er enige wax smelt.

Een tweede test gebeurde met een zelf gemaakte hot wire cutter. Hierbij wordt een dunne metalen draad verhit door er elektrische stroom door te laten vloeien. Het was mogelijk om hiermee doorheen de wax te gaan. Dit ging wel niet vlot en bovendien was de gemaakte snede zo dun dat de wax terug aan elkaar smolt na passage van de draad. Deze techniek bleek dus niet geschikt om de wax mee in stukken te zagen.



Figuur 18 – Hot wire cutting van een wax blokje.

3.8 Invloed op watereigenschappen

Omwillen van eerdere moeilijkheden met bepaalde meetapparatuur door lichte contaminatie van het water werd de invloed van een langdurige onderdompeling van wax op het water getest. Hiervoor werden twee verschillende aquaria gevuld met water uit de kelder van Hal 2. In één van de twee aquaria werd een blok wax ondergedompeld voor een periode van in totaal 8 weken.

Het monitoren van de invloed op het water gebeurde tweeledig:

- Watermonsters werden genomen bij de start van het experiment en na 4 weken. Deze samples werden geanalyseerd door het Provinciaal Instituut voor Hygiëne (PIH). Dit omvat de bepaling van het gehalte minerale olie volgens de GC/FID methode.
- Meting van de conductiviteit van het water door middel van gekalibreerde YSI's (toestel voor terreinmetingen van HIC)

De analyses door het PIH brachten niets aan het licht. Er werden geen fracties van minerale oliën gevonden in het water. Een kanttekening hierbij is wel dat de gebruikte methoden een detectielimiet hebben. Deze methoden worden echter ook gebruikt voor het analyseren van de drinkbaarheid van water.

Conductiviteit is een belangrijke parameter aangezien veel meettechnieken hier gebruik van maken. Een verandering in conductiviteit zal dus een verandering in meetresultaat opleveren. Indien de verandering slechts gestaag verloopt kan dit wel opgevangen worden door een periodieke kalibratie van de meettoestellen. De conductiviteit werd gemeten na 3 weken en na 8 weken:

Tabel 1 – Resultaten metingen conductiviteit

Conductiviteit (bij 17°C)	Na 3 weken	Na 8 weken
Kelderwater	297 $\mu\text{S}/\text{cm}$	352 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Kelderwater + wax	365 $\mu\text{S}/\text{cm}$	466 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Deze metingen tonen enerzijds aan dat het verblijf van wax in het water zijn invloed heeft op de conductiviteit. Anderzijds veranderd de conductiviteit, weliswaar in mindere mate, ook zonder aanwezigheid van de wax. Het ongemak van her-kalibratie is er dus sowieso. Bovendien valt op te merken dat de opgemeten veranderingen in conductiviteit klein (verwaarloosbaar?) zijn. Ter vergelijking de conductiviteit van zeewater is 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.9 Conclusie

3.9.1 Geschiktheid van Basewax 0597

Verschillende experimenten en tests werden uitgevoerd om de geschiktheid van Basewax 0597 voor het bouwen van grotere schaalmodellen volgens de CIRCUS-techniek verder te evalueren. De focus lag vooral op het smelt-, uithardings- en freesproces.

Voor het smelten van de wax werden verschillende technieken getest, waaronder een gewone oven, een heat gun, een infraroodlamp en een smeltketel. De infraroodlamp bleek bijzonder effectief, maar het opschalen voor het smelten van grotere hoeveelheden lijkt hiermee niet haalbaar. Het blijft wel een nuttig voor eventuele lokale aanpassingen aan een wax model. Voor het smelten wordt uiteindelijk de voorkeur gegeven aan een industriële smeltketel. Hiermee kunnen grotere hoeveelheden wax op een passieve manier (zonder tussenkomst) gesmolten worden.

Het uithardingsproces verloopt relatief snel. In een standaard bekisting van betonplex kleeft de wax nauwelijks. Er werd wel lichte krimp van +/- 1 % waargenomen. Het gebruik van EPDM-rubber in plaats van betonplex maakt het mogelijk om blokken met meer gebogen vorm te storten.

Wat betreft het frezen van de wax bleek een vlakke spiebaanfrees de beste keuze voor een efficiënt resultaat zonder nabewerking. De nauwkeurigheid kan zelf worden bepaald en ligt in balans met de productie tijd. De nauwkeurigheid wordt bepaald door de verticale resolutie van het frezen.

Voor schaalmodellen die volledig omgeven of zelfs ondergedompeld worden in water (zoals bvb in golfinstallaties), werd onderzocht of de gemiddelde dichtheid van de wax verhoogd kan worden om drijven te voorkomen. Menging met zand bleek hiervoor een zeer effectieve oplossing. Door de hoge dichtheid van het zand en de lage viscositeit van de gesmolten wax zakt het zand naar de onderste lagen van de wax, waardoor het frezen niet belemmert wordt. Bovendien is zand een goedkope vulstof. Het is echter minder eenvoudig om de wax en het zand achteraf terug van elkaar te scheiden.

Tot slot bleek het scannen van een wax-schaalmodel mogelijk met een optische scanner, zoals de FARO-arm. Tests toonden aan dat Basewax 0597 geen verzakking onder zijn eigen gewicht. Ook erosie door water lijkt niet voor te komen.

3.9.2 Strategieën voor de bouw van een groter schaalmodel met CIRCUS

Voor de creatie van een groter schaalmodel onderscheiden we twee strategieën:

- Gieten van 1 grote blok wax + verplaatsing/positionering van de freesmachine boven de wax blok
- Creatie van kleinere blokken welke op een aparte locatie gegoten en gefreesd worden en in het schaalmodel aan elkaar geplakt worden (puzzel principe)

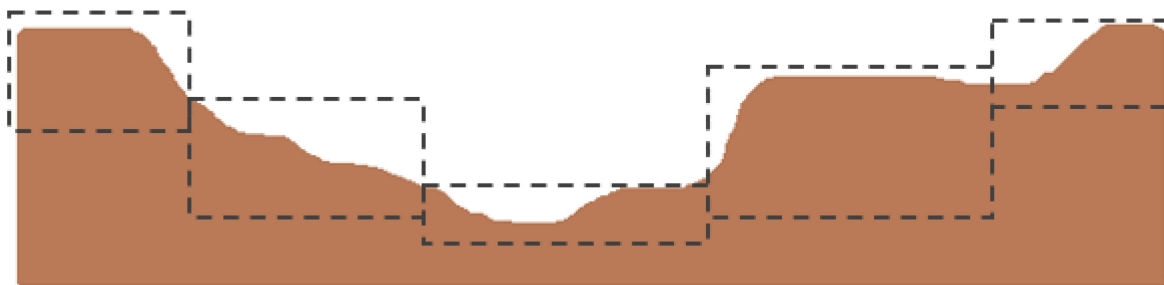
Elke strategie heeft zijn voor en nadelen. Welke de meest geschikte strategie is, zal dan ook verschillend zijn voor ieder project (planning, beschikbaarheid middelen, vereisten model, ...).

Gieten van 1 grote blok wax

Bij deze methode wordt de wax rechtstreeks gegoten op de locatie waar het schaalmodel uiteindelijk zal komen. Indien voor het project een grote hoeveelheid wax aangekocht moet worden, kan overwogen worden om de wax vloeibaar te laten leveren en meteen in de voorziene bekisting te pompen. Aangezien het basisprincipe van de CIRCUS-techniek uitgaat van hergebruik van reeds aangekochte wax, beschouwen we hier verder het smelten van waxblokken met behulp van smeltketels (zie 3.1.4).

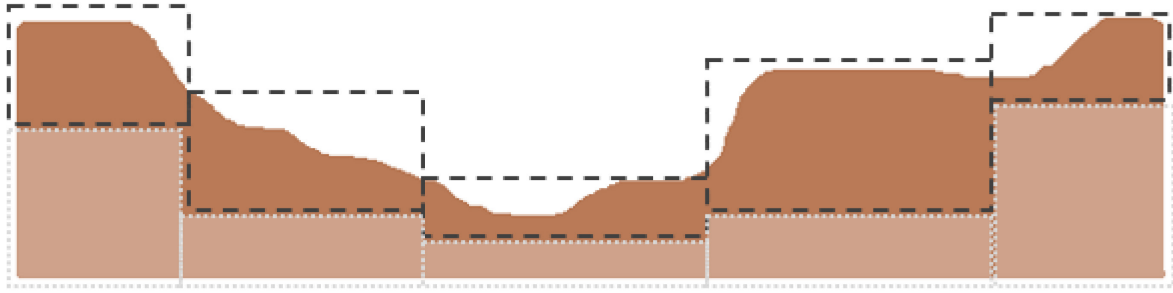
Om het gieten efficiënt te laten verlopen, moet er eerst een doordachte stortstrategie worden bepaald. In eerste instantie houdt dit in dat het schaalmodel wordt opgedeeld in grote blokken. Deze indeling vereist een afweging tussen het aantal blokken/vlakken en de benodigde hoeveelheid wax. Bij het frezen moet er immers altijd een teveel aan wax aanwezig zijn waaruit het schaalmodel gefreesd wordt. Het volume overtollige wax blijft liefst beperkt, aangezien het freesproces het meest tijdrovende proces is van het hele traject.

Een voorbeeld van stortstrategie wordt geïllustreerd in Figuur 19. Het bruine vlak stelt een dwarsdoorsnede van een schaalmodel van een rivier voor. De zwarte kaders duiden op de volumes wax die gegoten moeten worden (in 2D-weergave). Door enkel de witte achtergrond binnen de zwarte kaders weg te frezen, en niet het volledige witte vlak binnen de bruine contouren, wordt veel freeswerk uitgespaard. De gietvolgorde start met de buitenste volumes en werkt vervolgens naar binnen toe. Op deze manier kan de verticale rand van een eerder gegoten volume dienstdoen als bekisting voor het volgende volume. Door deze rand bloot te stellen aan de nieuwe gesmolten wax, ontstaat een betere hechting tussen de verschillende volumes. Dit hechtingsproces kan eventueel nog verbeterd worden door de verticale rand vooraf op te warmen, bijvoorbeeld met een IR-lamp.



Figuur 19 – 2D Voorbeeld van stortstrategie ter minimalisatie van het latere freeswerk. Het bruine stelt een doorsnede van een schaalmodel voor. De zwarte kaders zijn een voorstel van de te storten volumes wax.

Een tweede optimalisatie betreft het beperken van de benodigde hoeveelheid wax, door de te gieten volumes te onder vullen, zoals geïllustreerd in Figuur 20. Dit kan met eender welk materiaal of zelfs hol (plaatmateriaal). Een aandachtspunt is wel dat hechting tussen het materiaal en de wax vermeden wordt, zodat de wax maximaal gerecupereerd kan worden bij afbraak van het schaalmodel.



Figuur 20 – Ondervulling van de wax volumes geïllustreerd met de transparante licht grijze kaders

De smeltcapaciteit is beperkt wanneer gebruik wordt gemaakt van een smeltketel. Zo bedraagt de inhoud van de grootste smeltketel die verkrijgbaar is bij Sellacq Holland bijvoorbeeld 800 liter. Om tijd te besparen en grotere stortvolumes mogelijk te maken, kunnen meerdere smeltketels tegelijk ingezet worden. Idealiter wordt een volledig gietvolume in één keer gegoten. Eerdere tests, zoals beschreven in sectie 3.1.4, hebben immers aangetoond dat het storten van wax in meerdere lagen problematisch kan zijn tijdens het latere freesproces. De hechting tussen de lagen kan lokaal onvoldoende zijn, waardoor stukken/pellen wax kunnen afbreken tijdens het frezen. Eventueel kan ook dit verholpen worden door het gehele wax oppervlak te verwarmen alvorens te storten, maar dit lijkt minder tijdsefficiënt.

Voor het frezen moet een overspanning over het model worden opgebouwd. Hierop kan de freesmachine nauwkeurig worden gepositioneerd en gefixeerd. Na het inmeten van de exacte positie van de freesmachine kan het bijhorende freesprogramma bepaald worden, waarna het bereikbare gedeelte van het model gefreesd kan worden. Door meerdere freesmachines gelijktijdig in te zetten, kan de totale freestijd gereduceerd worden.

Voornaamste voordelen:

- Gietproces kan sterk versneld worden met levering van nieuwe vloeibare wax
- Geen naden → waterdicht model
- Geen naden → nauwkeuriger model
- De vlakheid van de vloer waarop het model gebouwd wordt is irrelevant

Voornaamste nadelen:

- Meer freeswerk → meer tijd
- Meer freeswerk → grotere hoeveelheid wax nodig
- Freesprogramma wordt ad hoc bepaald op basis van meting positie freesmachine
- Moeilijke logistiek van freesmachine en toebehoren
- Chronologisch werk en dus langer kritisch pad

Opbouw schaalmodel uit kleinere blokken

Bij deze methode wordt het schaalmodel opgedeeld in afzonderlijke stukken, vergelijkbaar met een puzzel. Elk stuk is een aparte blok wax, welke op een aparte toegewijde locatie gegoten en gefreesd wordt. Het volledige schaalmodel wordt opgebouwd door deze waxblokken naast elkaar te plaatsen.

Deze aanpak biedt de flexibiliteit om het giet- en freesproces uit te voeren op daartoe uitgeruste locaties, wat toelaat om het totale productieproces te optimaliseren. De gewonnen tijd bij het gieten en frezen gaat echter (deels) terug verloren door de tijd die nodig is om de blokken nauwkeurig te plaatsen.

Aangezien de ondergrond waarop het schaalmodel gebouwd wordt meestal niet volledig vlak of uniform is, moet dit bij het positioneren van de blokken gecorrigeerd worden. De plaatsing vereist daarom een nauwkeurige opmeting en eventueel bijsturing. Omdat de vorm van elk blok bekend is, kan dit proces goed voorbereid worden en eventueel parallel verlopen met het vervaardigen van de blokken.

Een belangrijk aandachtspunt is dat het schaalmodel door het tegen elkaar plaatsen van de blokken niet automatisch waterdicht is. Om dit te verhelpen, moeten de naden tussen de blokken worden opgevuld. Een mogelijke oplossing is om de bovenzijde van elk blok rondom te voorzien van een afgeschuinde rand — bijvoorbeeld 2 cm diep onder een hoek van 45°. Wanneer twee blokken tegen elkaar geplaatst worden, ontstaat zo een V-vormige groef die eenvoudig opgevuld kan worden met vloeibare wax. Voor een goede hechting moet de naad voldoende breed zijn zodat het toegevoegde waxvolume groot genoeg is om goed te versmelten met de oppervlaktes van de aangrenzende blokken.

De locatie van deze naden verdient bijzondere aandacht bij eventuele latere aanpassingen aan het schaalmodel. Bijvoorbeeld: wanneer men een pocket wil frezen om een beweegbare bodem te realiseren, en deze pocket kruist een naad, dan zal deze opnieuw uitgefreesd en waterdicht opgevuld moeten worden. Het aan elkaar smelten van blokken, zoals hier beschreven, is voorlopig nog theoretisch en werd binnen dit project nog niet getest.

Een cruciaal aspect van deze methode is dat de oppervlakte (grootte) van elk blok exact gelijk moet zijn. Omdat wax tijdens het uitharden krimpt, is een extra tussenstap noodzakelijk om dit te garanderen. Een mogelijke oplossing is om de blokken na uitharding uit hun bekisting te halen en de contouren op maat te zagen. Dit kan met een vaste installatie van twee cirkelzagen op een vaste onderlinge afstand. Ook dit proces kan semi-geautomatiseerd verlopen, zodat het weinig tijd vraagt. Het freesprotocol voor elk blok kan vooraf worden opgesteld, maar een goede markering is essentieel gezien de uniciteit van iedere waxblok.

Voornaamste voordelen:

- Optimalisatie in hoeveelheid wax (kost) en freestijd
- Seriematige productie blokken mogelijk
- Meer controle tijdens bouw schaalmodel: minder ad hoc aanpassingen en korter kritisch pad

Voornaamste nadelen:

- Naden → risico's op lekken
- Naden → minder nauwkeurig model
- Nog veel onzekerheden (nog te onderzoeken)

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be