01/24

steeldoc

Experiments



Table des matières

Éditorial 3

Filter House, Vernier, Genève
Une maison en perpétuel changement 4

Centre scientifique de l'espace Primeo Energie
Kosmos, Münchenstein
La forme suit la disponibilité 12

Passerelle MX3D, Amsterdam (Pays-Bas)
Tout a commencé par une idée … 18

Cody Dock Rolling Bridge, Londres (Royaume-Uni)
Rouler et retourner, ou comment réinventer
la passerelle 24

Impressum 31

Compétence dans la construction en acier

Le Centre suisse de la construction en acier (SZS) est une organisation professionnelle qui réunit les constructeurs de charpente métallique, les fournisseurs et sous-traitants et les bureaux d'études les plus importants de Suisse.
Par ses actions, le SZS atteint un large public de concepteurs, d'institutions et de décideurs. Le SZS informe ses membres et le public de l'évolution dans la construction en acier et offre un forum pour les échanges et la collaboration. Le SZS met à disposition les informations techniques, encourage la recherche et la formation des professionnels et s'engage dans la collaboration au-delà des frontières. Ses membres profitent d'une vaste palette de prestations

www.szs.ch/fr

Stahlbau Zentrum Schweiz
Centre suisse de la construction en acier
Centro svizzero per la costruzione in acciaio
Swiss Center for Steel Construction

Tout a commencé par une idée …

Maître de l'ouvrage
Ville d'Amsterdam

Ingénieur structure
Arup et MX3D

Conception
Joris Laarman Lab

Achèvement des travaux
2021



Vue aérienne.

La première passerelle en acier au monde à être réalisée par impression 3D enjambe le canal de l'Oudezijds Achterburgwal, dans le quartier rouge d'Amsterdam. Récompensée par plusieurs prix de design, elle apporte la preuve que la conception assistée par ordinateur associée à une technologie de soudage robotique de pointe peut faire de cette technique une réalité à grande échelle.

Michael Koller, architecte, urbaniste et journaliste

En s'y intéressant de plus près, ce qui ressemble de prime abord à une œuvre d'art épurée au design organique exposée dans l'espace public se révèle être le résultat d'une intense collaboration internationale de longue haleine entre instituts universitaires, ingénieurs structure, entreprises d'informatique et sociétés de construction métallique.
Conçue par Joris Laarman Lab et MX3D, cette passerelle incarne un projet de recherche innovant et interdisciplinaire. Couvrant différents domaines scientifiques, il a rassemblé des spécialistes de la science de données, de la statistique, des sciences de l'ingénieur et des matériaux, du design industriel, de l'informatique et de la philosophie de la technique pour les faire travailler de concert sur une initiative au potentiel révolutionnaire.

En 2018, la Commission européenne a par conséquent décerné à cette coopération intersectorielle le prix STARTS, acronyme de science, technologie et arts.

La passerelle piétonne MX3D enjambe d'un mouvement continu et fluide le canal de l'Oudezijds Achterburgwal, dans le quartier rouge d'Amsterdam. Son concepteur, le Joris Laarman Lab, l'a imaginé comme une œuvre de design dans l'espace public.



Cette distinction est accordée aux projets innovants et porteurs d'avenir à l'interface de ces trois domaines.

Et l'idée est devenue concept

Joris Laarman s'est associé à Gijs van der Velden, directeur de MX3D, une start-up qui s'est spécialisée dans le développement de la technologie robotisée de fabrication additive WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) pour l'impression 3D en acier. Dès le départ, les deux hommes voulaient concevoir avec cette passerelle piétonne une œuvre à la fois artistique et utile qui invite à se renseigner davantage sur les possibilités de ce procédé et l'état de la technique.
Comme le souligne Gijs van der Velden, de MX3D, l'ouvrage a été pensé comme un objet de design qui devait exploiter et présenter toutes les libertés qu'offrent les méthodes innovantes de production et de conception pour les éléments imprimés en acier, mais aussi démontrer comment ces technologies peuvent transformer le monde du bâtiment.

«La passerelle doit montrer que l'impression 3D a véritablement changé d'échelle et qu'il est désormais possible d'imprimer un objet infrastructurel fonctionnel destiné au quartier le plus animé d'Amsterdam», précise le directeur de la start-up.

Que cet objet de design soit une passerelle piétonne avait presque tout d'une évidence dans une ville comme Amsterdam. Cet emplacement dans le quartier rouge était tout indiqué pour deux raisons: d'une part, cette partie de la ville est extrêmement fréquentée, une caractéristique volontairement recherchée pour ce projet. D'autre part, l'ancien pont devait être restauré, ce qui nécessitait une solution provisoire. C'est également la raison pour laquelle la passerelle ne peut aujourd'hui plus être empruntée à cet endroit: en octobre, l'ouvrage 3D temporaire a été retiré. Selon un porte-parole de l'arrondissement Amsterdam-Centre, l'ancien pont, désormais réparé, va être réinstallé à son emplacement d'origine, probablement d'ici fin mars 2024.

En raison des nombreux paramètres encore inconnus au regard de la capacité des matériaux et de la portance de l'ouvrage, les risques du projet pilote ont été limités à une petite structure de moindre portée. Les étroits canaux du plus ancien quartier d'Amsterdam offraient donc un site idéal pour installer la passerelle.

Et l'idée a cherché un lieu

Initialement, il était en fait prévu d'imprimer le pont directement sur place. Comme l'explique Gijs van der Velden, plusieurs raisons se sont toutefois opposées à cette idée:

- Premièrement, dans ce quartier très dense, dynamique et animé, la place nécessaire manquait pour installer un chantier de plusieurs mois; le permis de construire aurait donc été refusé.
- Deuxièmement, les porteurs du projet ne voulaient pas exposer inutilement l'équipe de conception et de production ainsi que l'équipement technique aux aléas du climat.
- Troisièmement, ils voulaient minimiser les problèmes techniques et les risques liés au comportement encore inconnu du matériau (exposé aux incessantes variations de température et d'humidité sur place) qui auraient pu causer une défaillance de l'ouvrage.

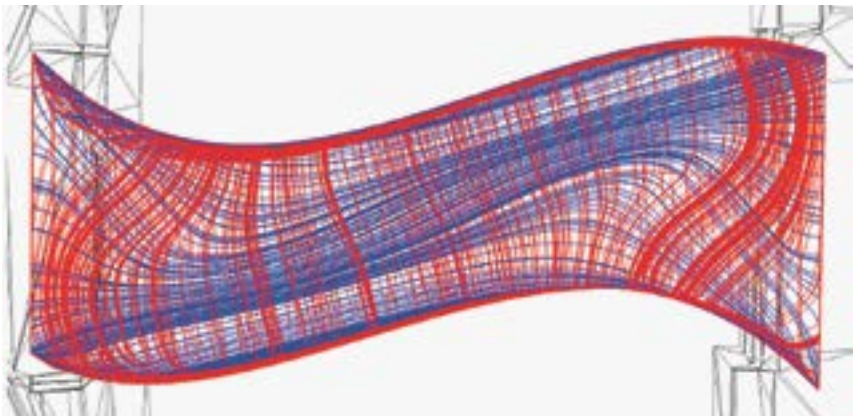
Pour toutes ces raisons, il a été décidé de délocaliser la production dans les ateliers de MX3D, sur le site de l'ancien chantier naval NDSM (Nederlandsche Scheepsbouw Maatschappij) à Amsterdam-Nord. Là, l'équipe du projet a pu reproduire la configuration du canal pour les différents tests avant de transporter la passerelle terminée par bateau jusqu'à son emplacement définitif.

Et l'idée a pris forme

Arup, l'entreprise d'ingénierie structurale, a joué un rôle décisif dans la conception du modèle, tandis que MX3D a développé le logiciel nécessaire à la transformation des machines de soudage en robots d'impression 3D.
Au départ, les modèles informatiques et les analyses se fondaient encore sur une structure arborescente à base de profilés.
L'équipe de conception dirigée par Joris Laarman connaissait d'expérience le potentiel et la faisabilité



Le robot de soudage 6 axes mis à disposition par ABB applique sans interruption les couches d'acier qui forment les éléments du parapet et les profilés creux en acier du tablier.







En haut: Les premières analyses informatiques avaient pour but d'étudier les principales courbes de contraintes et la répartition des forces de traction et de compression sur l'ouvrage. Ces courbes de contraintes ont servi de base pour concevoir la structure porteuse principale et ont également permis de déterminer la forme idéale qui assurerait l'utilisation la plus économe des matériaux.

À droite: Les mains courantes ininterrompues tout le long de la passerelle servent de membrures principales à la structure porteuse en U.

En bas: Les profilés en acier creux produits et courbés par impression 3D forment l'ossature secondaire du tablier tout en s'intégrant à la structure porteuse.

de telles structures spatiales porteuses, notamment au regard des possibles économies de matériaux et de la portance.
Après une phase de test de deux ans, deux constats techniques fondamentaux ont toutefois conduit à revoir le concept de la passerelle:

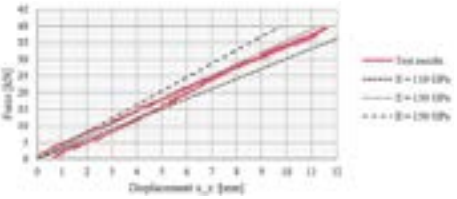
- D'une part, le risque d'effondrement était trop élevé si un bateau venait à endommager un profilé.
- D'autre part, l'impression horizontale était trop lente, car, outre la faible quantité de matériau applicable par couche, il fallait aussi prendre en compte les déformations dues au poids des robots, des facteurs qui se répercutaient en fin de compte sur le comportement structural de tout l'ouvrage. Pour accélérer la production et réduire les coûts, les couches ont finalement été réalisées verticalement.

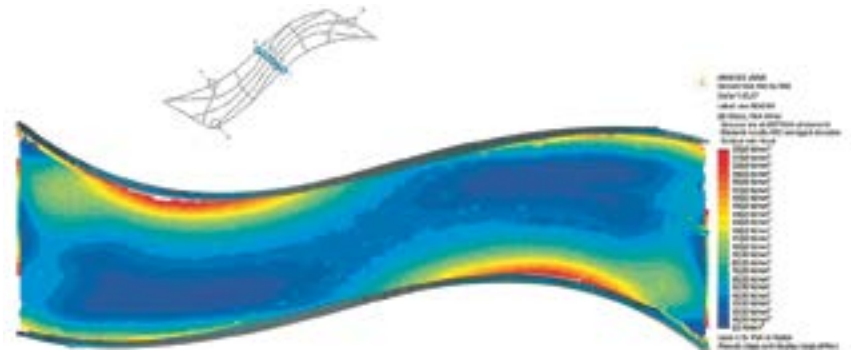
Ces nouvelles conditions et la décision d'imprimer à l'atelier ont eu un impact déterminant sur le projet. Arup a paramétré une structure porteuse en forme de U dans laquelle les mains courantes ininterrompues tout le long de la passerelle servent également de membrures principales. Les profilés en acier creux également produits et courbés par impression 3D forment l'ossature secondaire du tablier tout en s'intégrant à la structure porteuse.

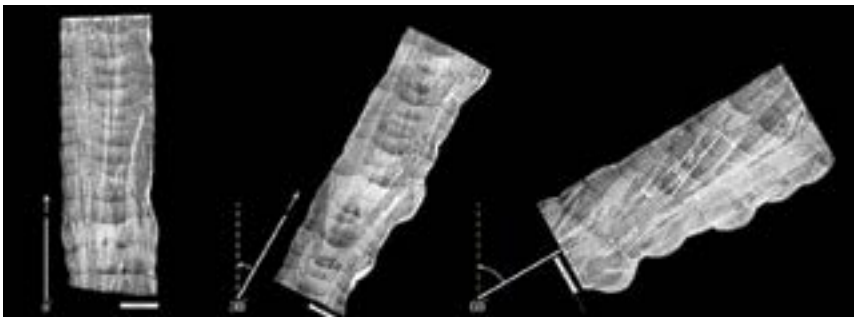
Les premières analyses informatiques avaient pour but d'étudier les principales courbes de contraintes et la répartition des forces de traction et de compression sur l'ouvrage. Ces courbes de contraintes ont servi de base pour concevoir la structure porteuse principale et pour déterminer la forme idéale qui assurerait l'utilisation la plus sobre des matériaux. Deux aspects tellement optimisés que le résultat définitif inclut aussi les marges de sécurité prescrites qu'exigeait la commune d'Amsterdam pour l'approbation du projet.

L'équipe de conception a entrepris un considérable processus d'itération composé d'une répétition de cycles de prototypage et de tests, afin de réaliser rapidement plusieurs phases de conception et d'arriver à la forme définitive de cette passerelle aux airs organiques. Ces itérations ont commencé à partir d'un modèle de passerelle monolithique en U. En parallèle, la prise en compte d'un jeu de paramètres prédéfinis a permis de garantir l'intégrité structurale et la fonctionnalité de l'ouvrage sans concessions sur les exigences esthétiques.
Ces méthodes ont garanti l'efficacité de la structure en concentrant l'acier là où la statique l'exigeait. Cette approche a fourni aux éléments porteurs les redondances nécessaires pour assurer la redistribution des forces internes en cas de défaillance locale.









En haut à gauche: Mise en charge à l'aide de blocs de béton aux extrémités et, entre eux, de gros réservoirs d'un mètre cube progressivement remplis d'eau pour assurer un essai de charge contrôlé.

En haut à droite: Résultats de tests concernant les prédictions de modèles pour différents modules de Young. Cette comparaison a été utilisée pour calibrer la résistance du modèle numérique à taille réelle.

Milieu: Dans le cadre d'une dernière analyse de robustesse, les profilés creux en acier du tablier ont été découpés en différents points spécifiques à l'aide de la méthode des éléments finis pour simuler de possibles défauts du matériau et leurs répercussions sur l'ensemble de la structure porteuse.

En bas: Les analyses microstructurales de l'acier imprimé laissent entrevoir l'impact de l'angle d'impression sur la géométrie et la structure du matériau ainsi que la manière dont les couches d'acier évoluent en fonction.

Grâce à la modélisation paramétrique, Arup a été en mesure d'accélérer considérablement le processus de conception.
Afin d'affiner le design, l'équipe a travaillé avec des programmes de modélisation comme Grasshopper et Karamba, qui s'appuient sur des algorithmes génératifs pour développer de nouvelles formes à utiliser dans Rhino.
Ce logiciel a permis d'attribuer au modèle informatique les propriétés précises des matériaux, mais aussi de réaliser des analyses et des simulations de mise en charge avant même de produire la passerelle. Les calculs structuraux ont également été combinés à des variantes géométriques pour réussir à optimiser l'utilisation des matériaux.

Et l'idée a été imprimée
Une fois arrivée à un modèle définitif début 2017, l'équipe a pu passer à la phase de production. Gijs van der Velden souligne qu'avec l'impression 3D de l'acier, il faut toujours partir du matériau et de ses propriétés, «car il n'y a pas d'éléments standards avec cette méthode de production et chaque projet est donc une toute nouvelle conception.»

Tant ArcelorMittal, le fournisseur d'acier, qu'Autodesk, le développeur logiciel, ont reconnu le caractère innovant et complexe de ce projet, qui a également repoussé les limites de leurs propres standards techniques.

La passerelle a été imprimée à l'aide d'une technologie robotisée de fabrication additive appelée WAAM, pour Wire Arc Additiven Manufacturing. Pour simplifier, cette technique connecte des machines de soudage conventionnelles à un bras robotisé à plusieurs axes. Contrôlé par ordinateur, celui-ci applique couche après couche l'acier liquide pour donner corps à une forme en trois dimensions.

L'impression a été réalisée avec de l'acier S308LSi austénitique et inoxydable. L'épaisseur des parois de la passerelle varie de 3mm à 10mm, un résultat obtenu en adaptant l'intensité du courant et la vitesse de dévidage. La compréhension des propriétés du matériau a été l'une des premières étapes du processus de conception. La séquence de tests poursuivait deux objectifs majeurs:
- Affiner les paramètres pour analyser les effets sur la structure.
- Définir la portance de la passerelle et des charges utiles autorisées.

Contrairement à l'acier de construction conventionnel, les courbes de contrainte-déformation de l'acier inoxydable ne présentent pas de limite d'élasticité clairement marquée. On a donc opté pour une limite d'élasticité conventionnelle de 0,2%. L'avantage manifeste de ce type d'acier réside dans sa résistance à la corrosion. Sa relative insensibilité face aux gros apports thermiques et donc au processus de soudage constitue un deuxième atout et lui permet de se prêter particulièrement bien à la WAAM.

Le matériau et les propriétés mécaniques de cet acier autoportant obtenu par impression 3D se distinguent de l'acier laminé classique. Un produit soudé présente une moindre homogénéité que des profilés métalliques classiques, par exemple laminé à chaud. Toutefois, les tests ont montré que les propriétés du matériau égalaient celles de l'acier inoxydable standard, notamment au regard de sa déformabilité plastique comme sa ductilité, sa ténacité et sa limite d'élasticité. De même, les contraintes résiduelles du matériau sont minimes. Toutefois, le module d'élasticité étant plus faible, les sections imprimées présentent une moindre rigidité.

Grâce à un programme de tests complet conçu spécialement pour la structure, il a été possible de mettre au point un modèle qui s'affranchit des matériaux traditionnellement utilisés. Ces essais ont été réalisés en collaboration avec l'équipe londonienne



Dans les ateliers de MX3D sur le chantier naval NDSM, la configuration et les murs du canal ont été reproduits à taille réelle pour la construction de la passerelle.

d'Arup spécialisé dans les matériaux, l'Imperial College London, ArcelorMittal, l'université technique de Delft, l'université de Twente et l'université de Bologne.

Des tests répétés ont permis à la conception de s'affranchir des matériaux codifiés. Les contrôles du matériau en laboratoire sur des échantillons imprimés de faible section transversale ainsi que les résultats de tests sur les éléments structuraux et les essais sur la structure porteuse définitive ont servi de base de travail aux ingénieures et ingénieurs pour l'élaboration du modèle. Les conclusions des séquences de tests et les valeurs de résistance à la traction et à la compression du matériau ont été intégrées à l'évaluation structurale pour permettre à l'équipe technique de contrôler et d'adapter la sécurité et l'utilisabilité de la passerelle.

Mark Girolami, ingénieur de l'université de Cambridge, a travaillé sur le modèle numérique avec son équipe et confirme que les premiers résultats sur la résistance de l'acier imprimé sont très positifs: «Nous avons notamment découvert que cette propriété dépend du sens d'impression. Il était toutefois assez surprenant de constater que la résistance de base était semblable à celle de l'acier fraîchement laminé. Dans certains sens, l'acier imprimé était même plus résistant.»

La passerelle en acier inoxydable de 12,2 m de longueur, 6,3 m de largeur et d'un poids de près de 4500 kg a été imprimée couche après couche par quatre robots de soudage 6 axes en l'espace d'environ six mois.
L'ouvrage terminé a été exposé et présenté au public en octobre 2018 à l'occasion de la Dutch Design Week. En 2019, l'université de Twente a testé la passerelle à sa charge de calcul maximale de 20 tonnes. En raison des difficultés d'accessibilité et du manque de place au niveau du canal, la passerelle MX3D a d'abord été chargée sur un ponton de transport, puis remorquée jusqu'à son emplacement définitif sur l'Oudezijds Achterburgwal. Là, elle a été hissée sur ses fondations à l'aide d'une grue, puis fixée aux appuis préparés à cet effet. L'inauguration et la mise en service officielles ont eu lieu le 15 juillet 2021 en présence de la reine Máxima.

Et l'idée est mesurée

«L'essence et l'attrait de l'impression 3D résident en fin de compte dans l'individualité de chaque projet, ce qui empêche en fait toute standardisation», précise Gijs van der Velden. «Chaque nouvel ouvrage constitue un nouveau projet de recherche pour lequel il convient d'effectuer à nouveau les phases de test avant de pouvoir garantir la stabilité et la capacité de charge de la structure spatiale.»

En parallèle de son installation sur le canal, la passerelle a été équipée d'un réseau de capteurs spécialement mis au point par Autodesk, Force Technology, l'Imperial College London, Lenovo et HBM avec l'objectif de collecter des données sur la structure: altérations des contraintes et des mouvements liées aux températures et aux intempéries comme le vent,

la corrosion et la qualité de l'air, comportement vibratoire et charges dynamiques lors des traversées piétonnes, flèche et forces de soutien exercées par le poids propre et des charges externes, etc.

Afin d'accélérer le processus de conception pour de futurs projets et de pouvoir réaliser plus rapidement certaines phases de test, l'institut Alan Turing a créé un jumeau numérique, autrement dit une réplique virtuelle de la passerelle. Alimenté par les données collectées sur place, il permet de modéliser numériquement la structure en tenant compte de l'évolution des conditions météorologiques et des rapports de charge.
On espère ainsi pouvoir partiellement préconfigurer de nouvelles structures en respectant certains paramètres conceptuels et matériels généraux, et les tester virtuellement à l'aide d'un jumeau numérique pour créer in fine des formes plus complexes.

Et l'expérience débouche sur de nouveaux projets
Malgré un processus de conception de longue haleine, toutes les parties prenantes considèrent cette expérience, la première passerelle au monde réalisée en acier imprimé, comme un véritable succès. Un constat que vient confirmer l'attrait pour ce système de production observé sur les salons internationaux dédiés à l'impression 3D, comme le salon de Francfort de novembre 2023.
L'avantage de cette méthode de fabrication réside selon Gijs van der Velden dans le fait qu'elle repose sur des matériaux et des techniques de production déjà connus et utilisés avec des technologies standards, évitant ainsi toute remise en question de leur fiabilité ou de leur sécurité fonctionnelle. D'après lui, s'agissant de machines existantes et déjà en usage, les appareils comme les robots de soudage d'ABB présentent également l'opportunité d'un déploiement rapide à grande échelle dans un avenir proche. Une hypothèse qui s'est déjà confirmée lors de ses tournées des salons internationaux.
Dès le départ, le Joris Laarman Lab et MX3D voulaient concevoir un système d'impression 3D pour l'acier susceptible d'être plus tard utilisé largement dans le secteur du bâtiment.
Un pari clairement gagné au vu des commandes de ponts de plus grande portée qu'ils ont reçues depuis l'achèvement de la passerelle piétonne d'Amsterdam. Même s'il ne se trouve plus à son emplacement d'origine, cet ouvrage leur a permis d'atteindre l'objectif escompté: faire changer d'échelle l'impression 3D de l'acier, passant de petits objets d'art à des projets de construction grandeur nature.



Projet Passerelle en acier imprimée en 3D
Lieu Croisement entre le canal d'Oudezijds Achterburgwal et le Stoofsteeg à Amsterdam-Centre (Pays-Bas)
Maître de l'ouvrage Ville d'Amsterdam
Design Joris Laarman Lab (Pays-Bas)
Ingénieur structure Arup
Analyse des matériaux et la structure porteuse Imperial College London (Royaume-Uni)
Fournisseur de l'acier ArcelorMittal Gandrange, Luxembourg
Entreprise de construction MX3D, Amsterdam; conseil Heijmans & Mous
Recherches Autodesk
Type de construction Impression 3D en acier / fabrication additive WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)
Poids 6,5 t au total, dont 4,5 t d'acier imprimé
Nuances d'acier Acier inoxydable
Dimensions Longueur: 12,2 m; largeur: 6,3 m; hauteur: 1,8 m

La passerelle imprimée dans le chantier naval NDSM est chargée sur un ponton de transport pour pouvoir être ensuite installée sur l'Oudezijds Achterburgwal.



Derniers ajustements du trottoir autour des appuis avant l'inauguration officielle par la reine Máxima le 15 juillet 2021.

Impressum

steel**doc** 01/24, mars 2024
Experiments

Éditeur:
SZS Centre suisse de la construction en acier, Zurich
Isabel Gutzwiller, Laurent Audergon

Rédaction et mise en page:
Isabel Gutzwiller, SZS

De nos membres:
Andrea Vieira, SZS

Relecture:
Hetty Bigelow, Isabel Gutzwiller, Anja Sierra

Correction:
FO Fotorotar AG, Egg

Traduction allemand-français / français-allemand:
Interserv AG, Michel Crisinel

Les descriptions des projets sont basées sur les données fournies par les concepteurs.
Les plans proviennent des bureaux d'étude ou d'entreprises de construction en acier.

Photos:
Couverture: Comte/Meuwly
Éditorial: Comte/Meuwly
pp. 4–11: Comte/Meuwly
pp. 12–17: Photos: Beat Ernst, Basel, © Rapp AG Münchenstein; Documents de planification: p. 14 Stamm Bau AG, p. 15 Jonas Warmuth & Jan Brütting – SXL, EPFL
pp. 18–23: Thea van den Heuvel (S. 18), Olivier de Gruijter (p. 19), Adriaan de Groot (p. 20 rechts), Joris Laarman (p. 20 unten), Thijs Wolzak (p. 22, p. 23 unten), Merlin Moritz (p. 23 oben)
pp. 24–29: Jim Stephenson (p. 24, p. 25, p. 26), Guy Archard (p. 27, p. 28), Thomas Randall-Page (Plan p. 24, Illustration p. 26), Price Myers (Pläne p. 27, Illustration p. 28)
p. 30: Baltensperger AG, Aeby Perneger & Associés SA

Conception graphique:
Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zürich

FSC RECYCLE Papier FSC® C004807

Fischer Papier: Rebello FSC – papier recyclé, mat, blancheur ISO 90, 100% de vieux papier, ange bleu

Impression et composition:
FO Fotorotar AG, Egg

ISSN 1662-2359

Abonnement annuel CHF 60.– / étranger CHF 90.–
Numéros isolés CHF 18.– / numéros doubles CHF 30.–
Sous réserve de changement de prix.
À commander sur www.szs.ch/fr/steel**doc**

Construire en acier/steel**doc**© est la documentation d'architecture du Centre suisse de la construction en acier et paraît quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les renseignements techniques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes, le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. La reproduction et la traduction, même partielles, de cette édition ne sont possibles qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication de la source.

Abonnement annuel à steeldoc pour CHF 60.– (gratuit pour les étudiants) sur www.szs.ch/fr/steeldoc

Stahlbau Zentrum Schweiz
Centre suisse de la construction en acier
Centro svizzero per la costruzione in acciaio
Swiss Center for Steel Construction

Seestrasse 105
CH-8002 Zürich
Tel. 044 261 89 80
info@szs.ch | www.szs.ch

01/24

steeldoc

Experimente



Inhalt

Editorial 3

Filter House, Vernier, Genf
Ein Haus, das sich stets wandelt 4

Science Center im Primeo Energie Kosmos, Münchenstein
Form folgt Verfügbarkeit 12

MX3D-Brücke, Amsterdam (NL)
Am Anfang stand eine Idee 18

Cody Dock Rolling Bridge, London (UK)
Rotieren und umdrehen – Brücke neu denken 24

Impressum 31

Kompetenz im Stahlbau

Das Stahlbau Zentrum Schweiz (SZS) ist das Schweizer Kompetenzforum für den Stahlbau. Als Fachorganisation vereint das SZS die wichtigsten stahlverarbeitenden Betriebe, Zulieferfirmen und Planungsbüros der Schweiz und erreicht mit seinen Aktivitäten mehr als 8000 Architektinnen, Bauplanende, Entscheidungsträger und Institutionen.
Das SZS informiert das Fachpublikum, fördert die Forschung, Entwicklung und Zusammenarbeit im Stahlbau, pflegt internationale Verbindungen und unterstützt die Aus- und Weiterbildung von Fachleuten. Seine Mitglieder profitieren von einem breiten Leistungsangebot zu günstigen Konditionen.

www.szs.ch

Stahlbau Zentrum Schweiz
Centre suisse de la construction en acier
Centro svizzero per la costruzione in acciaio
Swiss Center for Steel Construction

Am Anfang stand eine Idee

Bauherrschaft
Stadt Amsterdam

Tragwerksplanung
Arup und MX3D

Design
Joris Laarman Lab

Fertigstellung
2021



Luftaufnahme.

Die weltweit erste 3D-gedruckte Stahlbrücke für den Oudezijds Achterburgwal im Rotlichtviertel Amsterdams, die mit mehreren Designpreisen ausgezeichnet wurde, zeigt die Möglichkeiten, wie durch computerunterstütztes Design, verbunden mit modernster Roboterschweisstechnologie, die Idee des 3D-Stahldrucks auch grossmassstäblich in gebaute Realität umgesetzt werden kann.

Michael Koller, Architekt – Urban Planner – Journalist

Was sich in erster Instanz als ein einfaches, organisch designtes Kunstobjekt im öffentlichen Raum präsentiert, entpuppt sich bei genauerer Nachforschung als das Resultat einer intensiven, langjährigen und internationalen Zusammenarbeit zwischen Universitätsinstituten, Tragwerksplanern, Software- und Stahlbaufirmen.
Bei diesem von Joris Laarman Lab und MX3D initiierten Projekt handelte es sich um ein innovatives und interdisziplinäres Forschungsvorhaben in mehreren wissenschaftlichen Bereichen, das Expertinnen und Experten aus den Datenwissenschaften und der Statistik, dem Ingenieurwesen, den Materialwissenschaften, dem Industriedesign, der Informatik und der Technologiephilosophie zusammenbrachte, um an einem Projekt mit revolutionärem Potenzial zusammenzuarbeiten.

Diese übergreifende Kooperation wurde dementsprechend mit dem STARTS Prize 2018 (Science,



Die MX3D-Fussgängerbrücke spannt sich in einer durchgehenden, fliessenden Bewegung über den Kanal Oudezijds Achterbrugwal im Amsterdamer Rotlichtviertel und wurde von Joris Laarman Lab als Designobjekt im öffentlichen Raum entworfen.

Technology und Arts) der Europäischen Kommission honoriert: ein Preis, der für innovative und zukunftsweisende Projekte an der Schnittstelle von Wissenschaft, Technologie und Kunst vergeben wird.

Und die Idee wurde zum Design

Joris Laarman und Gijs van der Velden, Geschäftsführer von MX3D – einem Start-up-Unternehmen, das sich auf die Entwicklung roboterunterstützter WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)-Technologie für 3D-Stahldruck spezialisiert hat – ging es von Anfang an darum, mit der Fussgängerbrücke ein Ausstellungs- und Gebrauchsobjekt zu konzipieren, das Besucher anzieht, um mehr über die Möglichkeiten und den Stand der Technik im 3D-Stahldruck zu erfahren.
Wie van der Velden vom Joris Laarman Lab betont, ist die Brücke als Designobjekt und Forschungsvorhaben entworfen worden. Sie sollte die Gestaltungsfreiheiten der innovativen Design- und Produktionstechniken für 3D-gedruckte Stahlelemente ausschöpfen und darstellen; und aufzeigen, wie diese Technologien die Bauwelt beeinflussen können.

«Mittels der Brücke sollte den Menschen gezeigt werden, dass es im Bereich des 3D-Drucks einen Massstabssprung gegeben hat und dass es mittlerweile auch möglich ist, ein funktionelles Infrastrukturobjekt im geschäftigsten Viertel von Amsterdam zu drucken», so Velden.

Die Fussgängerbrücke als Designobjekt lag in einer Stadt wie Amsterdam quasi auf der Hand. Dieser Ort im Rotlichtviertel bot sich aus zwei Gründen an: Einerseits ist dieses Quartier ein Publikumsmagnet, den man für dieses Projekt bewusst gesucht hat; andererseits musste die alte Brücke restauriert werden und es musste eine Zwischenlösung gefunden werden. Das ist auch der Grund, weshalb diese Brücke an diesem Ort nicht mehr besucht werden kann. Im Oktober wurde die provisorische 3D-Brücke abgebaut. Nach Angaben eines Sprechers des Bezirks Centrum wird die alte Brücke, die inzwischen repariert wurde, wieder an ihren Platz gebracht. Vermutlich wird dies Ende März 2024 so weit sein.
Aufgrund der zahlreichen noch unbekannten Parameter bezüglich der Materialkapazitäten und der Tragfähigkeit des Bauwerks wurden die Risiken des Pilotprojekts auf eine kleine Struktur mit geringer Spannweite beschränkt. Daher erwiesen sich die schmalen Kanäle dieses ältesten Stadtgebiets Amsterdams als die beste Option für den Brückenstandort.



Der von ABB zur Verfügung gestellte 6-Achs-Schweissroboter trägt in einem ununterbrochenen Arbeitsschritt die Stahlschichten der Brüstungsteile und der Hohlstahlprofile des Laufstegs auf.

Und die Idee suchte einen Ort

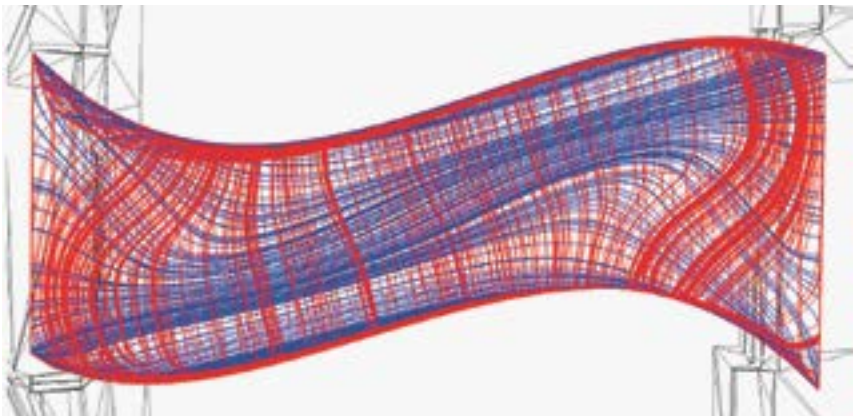
Tatsächlich war der Druck der Brücke ursprünglich direkt vor Ort geplant. Ein Vorhaben, das, wie van der Velden erklärt, aus verschiedenen Gründen fallen gelassen werden musste:

- Erstens mangelte es in dem sehr dichten, belebten und hektischen Stadtteil am notwendigen Platz, um eine mehrmonatige Baustelle einzurichten, weshalb eine Baubewilligung verweigert worden wäre.
- Zweitens wollte man das Design- und Produktionsteam sowie die technischen Apparaturen nicht den wechselnden Witterungseinflüssen aussetzen.
- Drittens wollte man technische Probleme und Risiken minimieren, die aufgrund des noch unbekannten Materialverhaltens (bei ständig wechselnden Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen vor Ort) zu einem Versagen des Bauwerks hätten führen können.

Aus diesen Gründen entschloss man sich, die Produktion in die Ateliers von MX3D in der NDSM-Werft (Nederlandsche Scheepsbouw Maatschappij) in Amsterdam-Noord zu verlegen, wo man die Kanalsituation für die verschiedenen Testversuche nachbaute und die fertige Brücke anschliessend auf einem Boot zum Kanal transportierte.

Und die Idee wurde zur Form

Arup spielte als Tragwerksplaner eine entscheidende Rolle bei der Entwurfsentwicklung, während MX3D die erforderliche Software entwickelte, um die Schweissmaschinen in 3D-Druckroboter umzuwandeln.
In den ersten Computerentwürfen und Analysen ging man noch von einer stabartigen Baumstruktur der Brücke aus.







Oben: Die ersten Computeranalysen dienten zur Ermittlung der Hauptspannungsverläufe und der Verteilung der Zug- und Druckkräfte in der Struktur. Auf Basis dieser Spannungsverläufe wurde die Haupttragstruktur entwickelt und gleichzeitig ermittelt, welche Form zum optimalen und effizientesten Materialeinsatz führen würde.

Rechts: Die ununterbrochenen und durchlaufenden Handläufe dienen als Hauptgurte des U-förmigen Tragwerks.

Unten: Die 3D-gedruckten und gekrümmten Hohlstahlprofile des Laufstegs bilden die Unterkonstruktion des Bodens und sind gleichzeitig Teil der Tragstruktur.

Das Designteam um Joris Laarman kannte aus Erfahrung das Potenzial und die Machbarkeit solcher räumlicher Tragwerke, insbesondere im Hinblick auf mögliche Materialeinsparungen und die Tragfähigkeit der Strukturen.

Nach einer zweijährigen Testphase musste das Konzept der Brücke jedoch aufgrund von zwei wesentlichen technischen Erkenntnissen verändert werden:

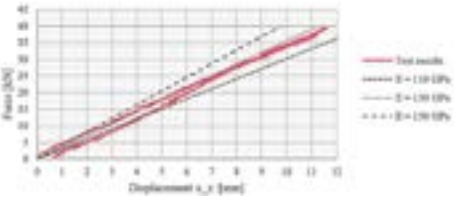
- Einerseits war das Risiko eines Brückeneinsturzes aufgrund der Beschädigung eines Stabs durch ein Boot zu hoch.
- Andererseits war das horizontale Drucken zu langsam, da nicht nur weniger Material pro Schicht aufgebracht werden konnte, sondern auch die Formveränderungen des Materials unter dem Gewicht der Roboter berücksichtigt werden musste. Dies hatte letztendlich Auswirkungen auf das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion. Um die Produktion zu beschleunigen und Kosten zu sparen, wurden die Schichten schliesslich vertikal aufgetragen.

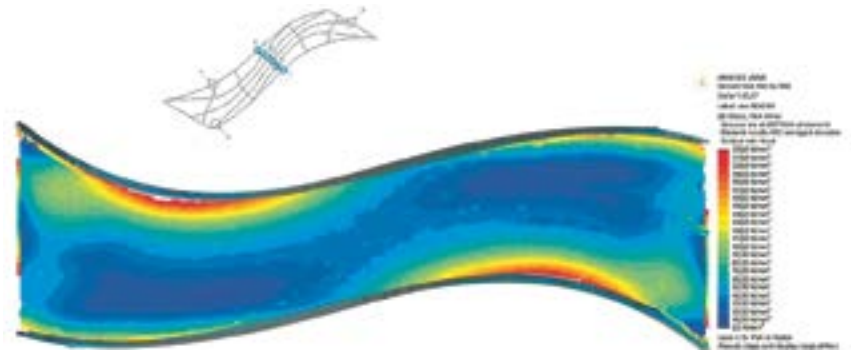
Diese geänderten Rahmenbedingungen und die Entscheidung, in der Werft zu drucken, beeinflussten den Entwurf entscheidend. Arup entwickelte ein parametrisch erstelltes, U-förmiges Tragwerk, in dem die ununterbrochenen und durchlaufenden Handläufe als Hauptgurte dienen. Die ebenfalls 3D-gedruckten und gekrümmten Hohlstahlprofile des Laufstegs bilden die Unterkonstruktion des Bodens und sind gleichzeitig Teil der Tragstruktur.

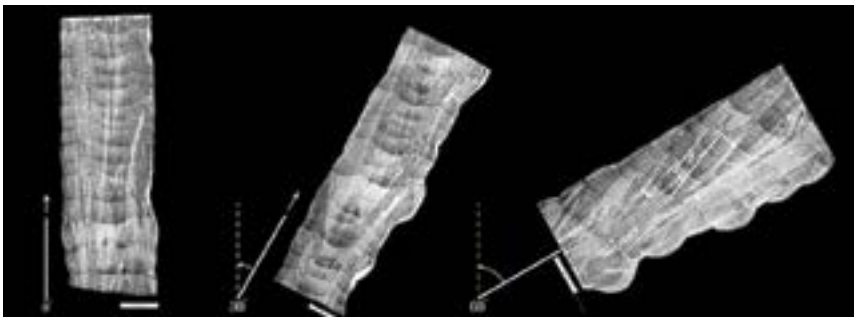
Die ersten Computeranalysen dienten zur Ermittlung der Hauptspannungsverläufe und der Verteilung der Zug- und Druckkräfte in der Struktur. Auf Basis dieser Spannungsverläufe wurde die Haupttragstruktur entwickelt und gleichzeitig ermittelt, welche Form zum optimalen und effizientesten Materialeinsatz führen würde. Die endgültige Form wurde sowohl in Bezug auf Tragwerk als auch Material so optimiert, dass sie die vorgeschriebene Sicherheitsmarge einschloss, die für die Genehmigung des Projekts durch die Gemeinde Amsterdam erforderlich war.

Das Designteam durchlief umfangreiche Iterationsverfahren, die aus wiederholten Zyklen von Prototyping und Testen bestanden, um mehrere Entwurfsphasen schnell zu durchlaufen und schliesslich zur endgültigen, organisch anmutenden Brückenform zu gelangen. Diese Iterationen begannen mit einem monolithischen, U-förmigen Brückenentwurf als Ausgangspunkt. Gleichzeitig konnte die strukturelle Integrität und Funktionalität gewährleistet werden, indem ein vorgegebener Satz von Parametern berücksichtigt wurde, ohne dabei Kompromisse bei den ästhetischen Anforderungen einzugehen.









Diese Methode gewährleistete eine effiziente Struktur, indem sie es ermöglichte, den Stahl gezielt dort zu konzentrieren, wo es strukturell notwendig war. Durch dieses Vorgehen wurde dem Tragwerk die notwendige Redundanz hinzugefügt, um im Falle eines lokalen Versagens eine Umverteilung der inneren Kräfte zu gewährleisten.

Die parametrische Modellierung ermöglichte Arup, den Designprozess erheblich zu beschleunigen. Zur Verfeinerung des Designs arbeitete das Team mit Entwurfs- und Computerprogrammen wie Grasshopper und Karamba, die auf der Grundlage generativer Algorithmen neue Formen für den Einsatz in Rhino entwickelten.
Mithilfe der Software konnten dem Computermodell präzise Materialeigenschaften zugewiesen und Belastungsanalysen und -simulationen durchgeführt werden, noch bevor die Brücke tatsächlich produziert wurde. Die Tragwerksberechnungen wurden dabei mit geometrischen Varianten kombiniert, um eine Optimierung des Materialeinsatzes zu erreichen.

Und die Idee wurde gedruckt
Nachdem das Team Anfang 2017 zu einem endgültigen Entwurf gelangt war, ging man zur Produktionsphase über. Gijs van der Velden betont, dass man beim 3D-Stahldrucken immer vom Material und seinen Eigenschaften ausgehen muss, «da es bei dieser Produktionsmethode keine Standardelemente gibt und damit jedes Projekt eigentlich eine Neuentwicklung darstellt.»

Sowohl ArcelorMittal als Stahllieferant als auch Autodesk als Softwareentwickler erkannten den innovativen Charakter und die Herausforderung des Projekts, die auch ihre eigenen technischen Standards an neue Limits brachten.

Die Brücke wurde mittels des roboterunterstützten Wire Arc Additiven Manufacuturing (WAAM) gedruckt. Vereinfacht ausgedrückt, verbindet WAAM konventionelle Schweissmaschinen mit einem mehrachsigen Roboterarm. Dabei trägt der computergesteuerte Arm den flüssigen Stahl Schicht für Schicht auf, um die dreidimensionale Form zu erstellen.

Die Brücke wurde aus S308LSi, einem austenitischen nichtrostenden Stahl, mit Wandstärken zwischen 3 mm und 10 mm gedruckt, wobei die Stromstärke und Drahtgeschwindigkeit an die unterschiedlichen Wandstärken angepasst wurden. Das Verständnis der Materialeigenschaften war einer der ersten Schritte des Designprozesses.

Die Testsequenz hatte zwei Hauptziele:
- mithilfe der Verfeinerung der Parameter die Einflüsse auf die Struktur zu analysieren
- die Tragfähigkeit der Brücke und der zulässigen Nutzlasten nachzuweisen

Im Gegensatz zu gewöhnlichem Baustahl weisen die Spannungs-Dehnungs-Kurven von Edelstahl keine deutlich ausgeprägte Streckgrenze auf. Als äquivalenter Wert zur Streckgrenze wird die 0,2%-Dehngrenze verwendet. Der offensichtlichste Vorteil dieses Stahltyps ist seine Korrosionsbeständigkeit. Ein weiterer Vorteil besteht in seiner relativen Unempfindlichkeit gegenüber grossen Wärmeeinträgen und dementsprechend dem Schweissprozess, wodurch er sich sehr gut für das WAAM eignet.

Das Material und die mechanischen Eigenschaften dieses selbsttragenden 3D-Druckstahls unterscheiden sich von herkömmlichem, gewalztem Stahl. Ein geschweisstes Produkt weist im Vergleich zu klassischen Stahlbauprofilen, beispielsweise warmgewalzten, eine geringere Homogenität auf. Jedoch haben Prüfungen ergeben, dass die Materialeigenschaften denen von Standard-Edelstahl ähneln, insbesondere hinsichtlich seiner plastischen Verformbarkeit wie Duktilität, Zähigkeit und

Oben links: Der Belastungsaufbau, bestehend aus Betonblöcken an den Enden und 1 m^3 grossen Würfeln dazwischen, die langsam mit Wasser gefüllt wurden, um einen lastgesteuerten Versuchsaufbau zu schaffen.

Oben rechts: Die Testergebnisse in Bezug auf Modellvorhersagen bei verschiedenen Young-Modulen. Dieser Vergleich wurde verwendet, um die Steifigkeit des numerischen Modells im Originalmassstab zu kalibrieren.

Mitte: In einer letzten Robustheitsuntersuchung wurden die Hohlstahlprofile des Laufstegs im Finite-Elemente-Modell an spezifischen Punkten geschnitten, um mögliche Materialdefekte zu simulieren und deren Auswirkungen auf die gesamte Tragstruktur zu prüfen.

Unten: Die mikrostrukturellen Untersuchungen des gedruckten Stahls lassen erkennen, welchen Einfluss der Druckwinkel auf die Geometrie und die Materialstruktur hat und wie sich die Stahllagen dementsprechend ändern.



In der Werkhalle von MX3D in der NDSM-Werft wurden die Kanalsituation und die Kanalmauern massstabsgetreu für den Bau der Brücke nachgebaut.

Streckgrenze. Zudem sind die Eigenspannungen des Materials sehr gering. Allerdings ist der Elastizitätsmodul niedriger, wodurch die gedruckten Abschnitte eine geringere Steifigkeit besitzen.

Dank eines umfangreichen Testprogramms, das spezifisch für die Struktur entwickelt wurde, war ein Entwurf möglich, der über die traditionell verwendeten Materialien hinausging. Diese Tests wurden mit Unterstützung des Materialteams in Arups Londoner Büro, dem Imperial College London, ArcelorMittal, der TU Delft, der Universität Twente und der Universität Bologna durchgeführt.

Durch wiederholte Tests wurde es möglich, das Design über die kodifizierten Materialien hinaus zu entwickeln. Materialprüfungen an gedruckten Mustern mit geringen Querschnitten im Labor sowie Ergebnisse von Strukturelementtests und Tests der endgültigen Tragstruktur dienten den Ingenieuren als Grundlage für die Ausarbeitung des Entwurfs. Die Ergebnisse der Testsequenzen und die Erkenntnisse der Zug- und Druckeigenschaften des Materials flossen in die Strukturbewertung ein und ermöglichten es den Ingenieurinnen und Ingenieuren, die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Brücke zu überprüfen und anzupassen.

Ingenieur Mark Girolami von der Universität Cambridge, der mit seinem Team am digitalen Modell arbeitete, bestätigt, dass die ersten Hinweise auf die Festigkeit des 3D-gedruckten Stahls positiv seien: «Wir haben unter anderem herausgefunden, dass die Kraft von der Richtung abhängt, in der gedruckt wird. Was uns jedoch in gewisser Weise überraschte, war, dass die Grundfestigkeit ähnlich war, wie man es von frisch gewalztem Stahl erwarten würde. In bestimmten Richtungen war der 3D-gedruckte Stahl sogar noch stärker.»

Die 12,2 m lange, 6,3 m breite und rund 4500 kg schwere Edelstahlbrücke wurde in einem Zeitraum von rund sechs Monaten von vier 6-Achs-Schweissrobotern Schicht für Schicht gedruckt.
Die fertige Brücke wurde im Oktober 2018 auf der Dutch Design Week aus- und den Besuchenden vorgestellt. 2019 wurde die Brücke an der Universität Twente auf die maximale Auslegungslast von 20 Tonnen getestet.
Aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit und des begrenzten Platzes am Kanal wurde die MX3D-Brücke zunächst auf einen Transportponton verladen und anschliessend an ihren Bestimmungsort am Oudezijds Achterbrugwal geschleppt. Dort wurde sie mithilfe eines Krans auf die Fundamente gehoben und in den vorbereiteten Auflagern verankert.
Am 15. Juli 2021 erfolgte die offizielle Eröffnung und Inbetriebnahme durch Königin Maxima.

Und die Idee wird gemessen

«Die Essenz und der Reiz des 3D-Drucks liegen letztlich in der Individualität jedes einzelnen Projekts, wodurch es eigentlich keine Standardisierung gibt», wie van der Velden betont: «Jedes neue Objekt stellt ein neues Forschungsprojekt dar, bei dem die Testphasen erneut durchlaufen werden müssen, bevor die Stabilität und Belastbarkeit einer räumlichen Struktur garantiert werden können.»

Parallel mit der Installation der Brücke am Kanal wurde ein von Autodesk, Force Technology, Imperial College London, Lenovo und HBM spezifisch entwickeltes Sensorennetzwerk an der Brücke angebracht, mit dem Ziel, Daten über die Brücke zu sammeln: Spannungs- und Bewegungsveränderungen durch Temperatur- und Witterungseinflüsse wie Wind, Korrosion und Luftqualität; Vibrationsverhalten und dynamische Belastungen beim Überqueren durch zu Fuss Gehende, Durchbiegungs- und Stützkräfte durch Fremd- und Eigengewicht etc.

Um den Entwicklungsprozess weiterer Projekte zu beschleunigen und gewisse Testphasen in der Zukunft schneller durchlaufen zu können, entwickelte das Alan Turing Institute einen Digital Twin, also einen virtuellen, digitalen Zwilling der Brücke, der mit den vor Ort gemessenen Daten gespeist wurde, um die Struktur unter den sich verändernden Witterungs- und Belastungsverhältnissen digital zu modellieren.
Auf diese Art und Weise hofft man, unter Einhaltung bestimmter allgemeiner Entwurfs- und Materialparameter neue Strukturen teilweise vorausberechnen und in einem Digital Twin virtuell testen zu können und auf diese Weise komplexere Formen zu kreieren.

Und dem Experiment folgen weitere Projekte
Das Experiment der weltweit ersten 3D-gedruckten Stahlbrücke wird von allen Parteien, trotz des langatmigen Entwicklungsprozesses, als absoluter Erfolg beurteilt und durch die Nachfrage nach dem Produktionssystem auf internationalen Messen für 3D-Druck, wie der Frankfurter Messe im November 2023, bestätigt.
Den Vorteil der angewandten Produktionsmethode sieht Gijs darin, dass sie von bereits bekannten und gebräuchlichen Materialien und Produktionstechniken mit Standardmaschinen ausging, wodurch die Zuverlässigkeit und die Funktionssicherheit nicht in Frage gestellt wurde. Da es sich bei den Apparaturen, wie den Schweissrobotern von ABB, um bereits existierende und verwendete Maschinen handelt, sieht er auch schnell umsetzbare und umfangreiche Einsatzmöglichkeiten in der nahen Zukunft. Diese Annahme von Gijs hat sich bereits auf internationalen Messebesuchen bestätigt.
Von Beginn an war das Ziel von Joris Laarman Lab und MX3D, ein 3D-Drucksystem für Stahl zu entwickeln, das in der Zukunft auf breiterem Niveau im Bauwesen eingesetzt werden kann.
Neue Aufträge für Brücken mit grösseren Spannweiten, die sie seit der Fertigstellung der Fussgängerbrücke in Amsterdam erhalten haben, bestätigen, dass ihre Rechnung aufgegangen ist. Mit der Brücke haben sie tatsächlich, wie erhofft, den Massstabssprung von kleinen Kunstobjekten zu grossformatigen Bauprojekten im Bereich des 3D-Stahldrucks eingeleitet – auch wenn sie nicht mehr an dieser Stelle zu finden ist.



Projekt 3D-gedruckte Stahlbrücke,
Ort Kreuzung Oudezijds Achterburgwal mit dem Stoofsteeg Amsterdam-Centrum (NL)
Bauherrschaft Stadt Amsterdam
Design Joris Laarman Lab (NL)
Tragwerksplanung Arup
Material- und Tragwerksanalyse Imperial College London (UK)
Lieferant Stahl ArcelorMittal, Gandrange, Luxemburg
Baufirma MX3D, Amsterdam; Beratung Heijmans & Mous
Forschungsarbeit Autodesk
Konstruktionsart 3D-Stahldruck / WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)
Tonnage 6,5 t gesamt, davon 4,5 t gedruckt
Stahlsorten Edelstahl
Abmessungen Länge: 12,2 m; Breite: 6,3 m; Höhe: 1,8 m

Die in der NDSM-Werft gedruckte Brücke wird für die Installation am Oudezijds Achterbrugwal auf einen Transportponton verladen.



Die letzten Anpassungen des Trottoirs im Bereich der Auflager für die offizielle Eröffnung durch Königin Maxima am 15. Juli 2021.

Impressum

steel**doc** 01/24, März 2024
Experimente

Herausgeber:
SZS Stahlbau Zentrum Schweiz, Zürich
Isabel Gutzwiller, Laurent Audergon

Redaktion, Layout:
Isabel Gutzwiller, SZS

Mitgliederseite:
Andrea Vieira, SZS

Lektorat:
Hetty Bigelow, Isabel Gutzwiller, Anja Sierra

Korrektorat:
FO Fotorotar AG, Egg

Übersetzung DE–FR:
Interserv AG, Michel Crisinel

Projektbeschriebe aufgrund der Projektinformationen der Planenden. Die Pläne stammen von den Planungsbüros oder Stahlbauunternehmen.

Fotos:
Titelseite: Comte/Meuwly
Editorial: Comte/Meuwly
S. 4–11: Comte/Meuwly
S. 12–17: Fotos: Beat Ernst, Basel, © Rapp AG Münchenstein; Pläne: S. 14 Stamm Bau AG, S.15 Jonas Warmuth & Jan Brütting – SXL, EPFL
S. 18–23: Thea van den Heuvel (S. 18), Olivier de Gruijter (S. 19), Adriaan de Groot (S. 20 rechts), Joris Laarman (S. 20 unten), Thijs Wolzak (S. 22, S.23 unten), Merlin Moritz (S. 23 oben)
S. 24–29: Jim Stephenson (S. 24, S. 25, S. 26), Guy Archard (S. 27, S. 28), Thomas Randall-Page (Plan S. 24, Illustration S. 26), Price Myers(Pläne S. 27, Illustration S. 28)
S. 30: Baltensperger AG, Aeby Perneger & Associés SA

Designkonzept:
Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zürich

FSC RECYCLED Papier FSC® C004607

Fischer Papier: Rebello FSC, Recycling, matt, ISO-Weisse 90, 100% Altpapier, Blauer Engel

Satz, Druck:
FO Fotorotar AG, Egg

ISSN 1662-2359

Jahresabonnement Inland CHF 60.– / Ausland CHF 90.–
Einzelexemplar CHF 18.– / Doppelnummer CHF 30.–
Preisänderungen vorbehalten
Bestellung unter www.szs.ch/steel**doc**

Bauen in Stahl/steel**doc**© ist die Bautendokumentation des Stahlbau Zentrums Schweiz und erscheint viermal jährlich in deutscher und französischer Sprache. Mitglieder des SZS erhalten das Jahresabonnement und die technischen Informationen des SZS gratis.

Die Rechte der Veröffentlichung der Bauten bleiben den Architekten vorbehalten, das Copyright der Fotos liegt bei den Fotografen. Ein Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlags und exakter Quellenangabe gestattet.

steeldoc abonnieren für CHF 60.– im Jahr (Studierende gratis) auf www.szs.ch/steeldoc

Stahlbau Zentrum Schweiz
Centre suisse de la construction en acier
Centro svizzero per la costruzione in acciaio
Swiss Center for Steel Construction

Seestrasse 105
CH-8002 Zürich
Tel. 044 261 89 80
info@szs.ch | www.szs.ch