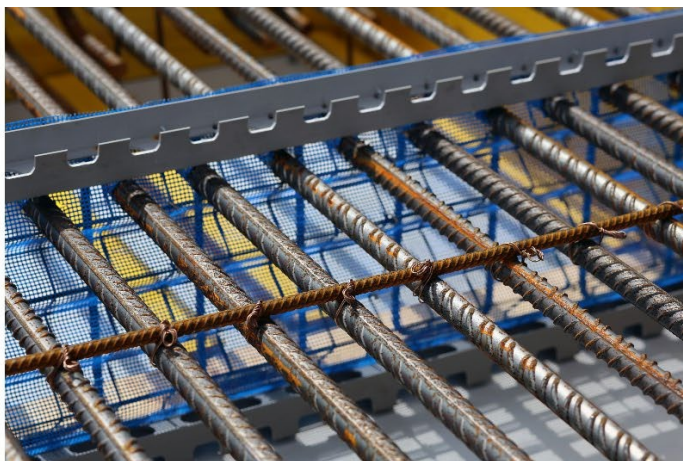
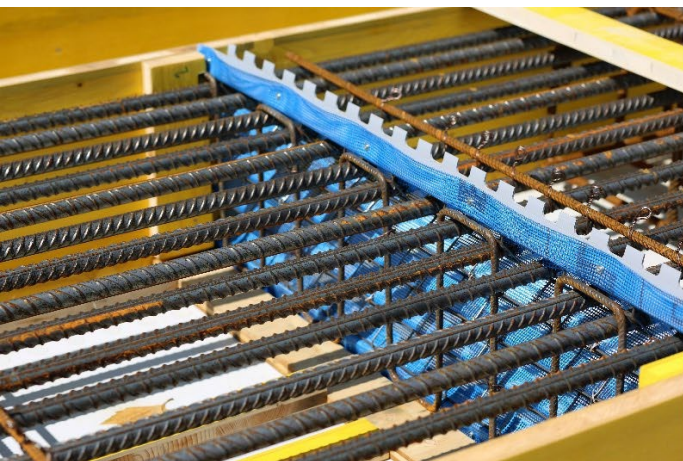


## Développement d'un élément de coffrage dans les panneaux sans réduction de la résistance à l'effort tranchant

Centre de haute technologie du canton d'Argovie HTZA : étude de

faisabilité Partenaire industriel : Profilsager AG, Dürrenäsch



Prof. Dr Simon Zweidler

Beat Häfeli, ingénieur d'essai et de développement, ingénieur en mécanique BSc.

Emanuel Amer, collaborateur scientifique, ingénieur civil MSc.

Muttenz, 25.06.2024

### **Remarques**

Les graphiques : Tous les diagrammes le sont avec une grille d'un centimètre. L'impression à la taille réelle sur A4 permet une lecture graphique avec une règle graduée.

Droits : Tous les droits d'image et de graphique appartiennent au département de statique et de mécanique de la Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse. Ils ne peuvent pas être réutilisés sans autorisation.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
1.1	Situation de départ	5
1.2	Mission	6
1.3	Délimitation	6
<b>2</b>	<b>Bases théoriques</b>	<b>7</b>
2.1	Introduction	7
2.2	Joints de cisaillement en flexion	7
2.3	Théorie critique du cisaillement (CSCT)	8
2.4	Théorie du champ de compression modifié (MCFT)	8
<b>3</b>	<b>Développement</b>	<b>9</b>
3.1	Introduction	9
3.2	Objectifs de développement	9
3.3	Premiers pas	10
3.4	Prototype	12
<b>4</b>	<b>Dimensionnement du corps d'épreuve</b>	<b>14</b>
4.1	Conception	14
4.2	Dimensions	15
4.3	Matériaux	16
4.4	Résistance à la flexion	16
4.5	Résistance à l'effort tranchant	18
<b>5</b>	<b>Production</b>	<b>19</b>
5.1	Dimensions	19
5.2	Armature de flexion et d'effort tranchant	21
5.3	Matériaux	22
5.4	Fabrication	22
<b>6</b>	<b>Essais de matériaux</b>	<b>24</b>
6.1	Acier d'armature	24
6.2	Béton	27
<b>7</b>	<b>Prévisions</b>	<b>30</b>

7.1	Résistance à la flexion	30
7.2	Résistance à l'effort tranchant	30
<b>8</b>	<b>Préparation de l'essai</b>	<b>31</b>
8.1	Dispositif expérimental	31
8.2	Préparation de l'essai	33
8.3	Concept de mesure	33
8.4	Programme d'essai	35
8.5	Déroulement de l'essai de charge	36
<b>9</b>	<b>Résultats des essais</b>	<b>38</b>
9.1	Eprouvette P 1.1	38
9.2	Eprouvette P 1.2	40
9.3	Eprouvette P 3.1	42
9.4	Eprouvette P 3.2	44
9.5	Eprouvette P 4.1	46
9.6	Eprouvette P 2.1	48
9.7	Eprouvette P 2.2	50
9.8	Eprouvette P 4.2	52
9.9	Eprouvette P 5.1	55
9.10	Eprouvette P 5.2	58
<b>10</b>	<b>Résumé</b>	<b>61</b>
10.1	Comparaison des charges de rupture	61
10.2	Conclusion	62



# 1 Introduction

## 1.1 Situation de départ

La société ProfilSager AG, représentée par son directeur Stephan Sager, a acquis une compétence clé dans le développement et la fabrication de profilés en plastique pour le bâtiment. L'entreprise s'est notamment distinguée par le développement de son propre écarteur d'armature.

"Ferrofix" en tant que fournisseur de produits en Suisse. L'entreprise souhaite maintenant se développer stratégiquement dans le domaine de l'ingénierie, ce qui devrait se traduire par une extension correspondante de la gamme de produits.

L'entreprise identifie l'un de ces projets d'avenir possibles dans le produit d'un élément de coffrage nécessaire à l'échelonnement de plaques de béton armé. Simon Zweidler et l'équipe du laboratoire de construction FHNW, une demande de soutien financier pour une étude de faisabilité a été déposée auprès du centre de haute technologie d'Argovie HTZA, qui l'a acceptée le 1er novembre 2021.

Mission :	Etude de faisabilité pour le développement d'un élément de coffrage qui peut être installé dans des dalles sans armature d'effort tranchant sans perte de transmission d'effort tranchant.
Mandataire :	Centre de haute technologie d'Argovie HTZA, Badenerstrasse 13, 5200 Brugg. N° de projet HTZ : 1 0.00502.02.2.
Tuteur :	Leendert den Haan, expert en technologie & innovation.
Partenaires de recherche :	Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse, Haute école HABG, Institut für Bauingenieurwesen IBau, Baulabor FHNW.
Chef de projet :	Prof. Dr Simon Zweidler.
Partenaires industriels :	Profilsager AG, Alte Hallwilerstrasse 13, 5724 Dürrenäsch.
Demandeur :	Stephan Sager

## 1.2 Mission

L'étude "Elément de coffrage avec pénétration de fer" doit non seulement satisfaire à la faisabilité technique, mais aussi tenir compte des exigences suivantes des différents spécialistes impliqués dans les travaux :

- Le polisseur : Élément robuste lors de l'installation, facile à manipuler lors de la pénétration de l'armature.
- Ingénieur civil : l'élément de coffrage répond aux exigences de transmission des forces requises ; il ne constitue pas un affaiblissement en ce qui concerne la résistance à l'effort tranchant.
- maître d'œuvre : Économique à l'achat et à l'installation.

L'objectif prioritaire est de développer un élément de coffrage qui ne présente pas de déficit de résistance à l'effort tranchant pour les dalles sans armature d'effort tranchant.

Après la phase de développement, le prototype sélectionné doit être soumis aux essais mécaniques suivants dans le laboratoire de construction de la FHNW, sur la base d'un prog- nose détaillé :

- Détermination des caractéristiques des matériaux.
- Essais d'effort tranchant sur des éprouvettes bétonnées de part en part ; elles servent de valeurs de référence.
- Essais d'effort tranchant sur des éprouvettes avec élément de coffrage, mais sans renforcement de l'effort tranchant.
- Essais d'effort tranchant sur éprouvettes avec élément de coffrage et renforcement intégré de l'effort tranchant.

## 1.3 Délimitation

La présente étude vise à confirmer la faisabilité technique des exigences énoncées au chapitre 1.2. Ceci en partant des hypothèses suivantes : Les éprouvettes de la série d'essais ont été fixées à une épaisseur de dalle fréquemment utilisée de 30 cm et à une qualité de béton C30/37. Dans la pratique de la construction, on utilise généralement des épaisseurs de dalles et de planchers sans armature d'effort tranchant de l'ordre de 20 à 40 cm, ainsi que des qualités de béton courantes allant de C20/25 à C40/50. Les résultats et les conclusions de cette étude se limitent donc à l'épaisseur de la dalle et à la qualité du béton choisies et ne peuvent pas être transposés ou généralisés sans autre à d'autres cas d'application, épaisseurs de dalles ou caractéristiques de matériaux.

Une proposition de dimensionnement comme généralisation des domaines mentionnés en ce qui concerne les épaisseurs de dalles et les qualités de béton ne fait pas l'objet de la présente étude de faisabilité. Cela se manifeste en particulier dans le choix de l'armature d'effort tranchant des dalles dont l'épaisseur est comprise entre 30 cm et 40 cm, ainsi que pour les qualités de béton plus élevées.

La conception de la denture pourrait être vérifiée quantitativement au moyen d'essais permettant de déterminer séparément le comportement à la rupture de l'âme. Une série d'essais correspondante a déjà été élaborée au niveau conceptuel ; les essais ne font toutefois pas l'objet de l'étude de faisabilité et doivent donc encore être réalisés.

## 2 Bases théoriques

### 2.1 Introduction

Pour le dimensionnement des joints de cisaillement, la distinction entre le cisaillement longitudinal et le cisaillement transversal au joint est d'une importance capitale en raison des différents modes de charge [22].

Lorsque les joints sont parallèles à l'axe de l'élément de construction, on parle de joints de cisaillement. Les exemples typiques sont les compléments de béton coulé sur place pour les éléments de plafond préfabriqués ou les joints de construction entre les plafonds et les éléments de mur. La résistance ultime d'un joint de cisaillement est basée sur le modèle de la théorie du frottement de cisaillement [22], qui se compose de l'adhérence, du frottement et de la sollicitation de cisaillement. Il existe différentes approches de dimensionnement dans les différentes normes, comme par exemple dans la norme SIA 262:2013 [18].

Les joints perpendiculaires à l'axe de l'élément de construction subissent en outre une contrainte de flexion ; on parle de contrainte de cisaillement de flexion. Les joints de construction de plaques perpendiculaires à l'axe de l'élément en sont un exemple typique. La résistance au cisaillement de tels joints est essentiellement influencée par la denture du joint ainsi que par la résistance à la traction du béton.

### 2.2 Joints de cisaillement en flexion

Dans [22], Zilch et Fingerloos présentent les différentes conceptions de modèles des joints décrits au chapitre 2.1. Ils expliquent que le joint perpendiculaire à l'axe de l'élément de construction avec une contrainte de flexion prépondérante doit être traité de manière analogue à une fissure de flexion. Les contraintes de cisaillement sont transmises aux bords de la fissure au moyen d'une denture. Afin garantir une denture, la norme DIN 1045-1:2008 se limite, sur la base de valeurs empiriques, à des joints rugueux et dentés [11]. La formation de joints dentés permet de garantir un comportement porteur quasi monolithique ; la vérification ne nécessite pas de réduction. Par conséquent, la résistance à l'effort tranchant doit être réduite dans le cas de joints uniquement rugueux.

Cette proposition de dimensionnement a été reprise dans la norme DIN 1045-1:2008-08, 10.3.6 [11] ; avec le passage à l'Eurocode 2011, cette indication de dimensionnement ne figure plus que dans l'annexe nationale de l'Allemagne ; voir à ce sujet les explications dans la norme DIN EN 1992-1-1:2011 [12] [13]. En revanche, les normes SIA 262 et EN 1992-1-1 actuellement en vigueur en Suisse ne contiennent aucune indication sur le joint de poussée en flexion.

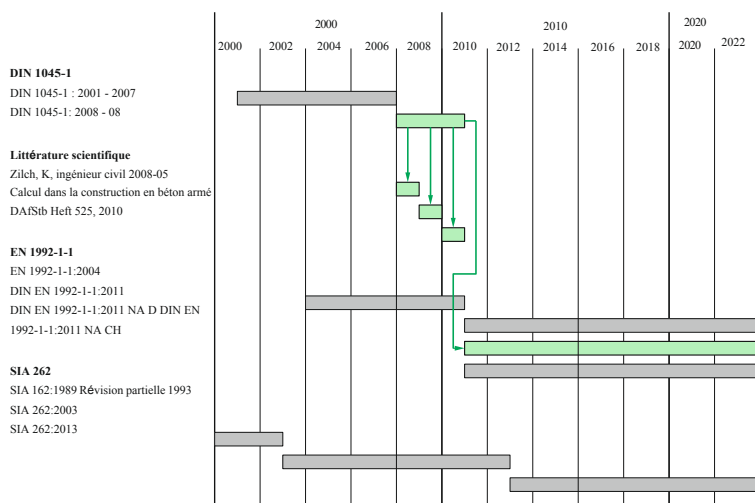


Image 1 : Chronologie : thématisation des joints de poussée et de flexion dans les normes correspondantes.

### **2.3 Théorie critique du cisaillement (CSCT)**

Muttoni a une corrélation entre la formation de fissures de flexion et la résistance à l'effort tranchant correspondante. Il déduit de ces observations qu'une fissure de flexion traversant l'effort de compression a une influence importante sur la résistance à l'effort tranchant. Il en déduit un modèle empirique [16] pour le calcul de la résistance à l'effort tranchant d'éléments de construction sans armature d'effort tranchant ; une extension du modèle se dans [17]. Selon le modèle, la résistance à l'effort tranchant dépend de manière déterminante de la largeur et de la rugosité de la fissure ; l'effet porteur effectif résulte de l'imbrication des bords de la fissure dans les fissures de flexion.

Ce modèle, appelé "Critical Shear Crack Theory (CSCT)", constitue, dans une représentation simplifiée, la base du dimensionnement à l'effort tranchant des dalles sans armature d'effort tranchant dans la norme SIA262:2013 [18] ; il a été utilisé pour déterminer le pronostic des éprouvettes de référence présentées ici.

### **2.4 Théorie du champ de compression modifié (MCFT)**

La théorie du champ de compression modifié [8] est une extension des modèles classiques de champ de compression ; elle décrit un élément de dalle en béton armé soumis à un cisaillement, fissuré et armé perpendiculairement. On part du principe que jusqu'à une ouverture de fissure de cisaillement donnée, il existe un effet porteur combiné de l'armature d'effort tranchant et de la denture de la fissure. La détermination de la transmission du cisaillement par les bords de la fissure se base sur les travaux de Walraven. La solution complète de la MCFT ne peut pas être résolue analytiquement et ne convient donc pas aux tâches de dimensionnement simples. Le développement de la Simplified Modified Compression Field Theory [5] permet une représentation simplifiée des calculs complexes de la MCFT.

Cette forme simplifiée de la MCFT est utilisée dans différentes normes comme base pour le calcul des efforts tranchants des éléments en béton armé, comme par exemple le fib Model Code 2010 [6], la norme américaine de construction de ponts AASHTO LRFD [1] ou la norme canadienne de construction en béton CSA [7].

## 3 Développement

### 3.1 Introduction

Les éléments en béton de grande taille, comme les dalles, ne peuvent que rarement être coulés en une seule fois. Pour des raisons pratiques et économiques, l'échelonnement des travaux nécessite des joints de construction. Souvent, le rendement journalier du bétonnage est la grandeur limitante, ce qui rend nécessaire un échelonnement au moyen de joints de construction. En outre, il est possible de réduire les fissures dans certaines situations en laissant temporairement fentes de retrait entre les différentes étapes de construction. Pour des raisons économiques, il peut être intéressant de procéder à des étapes de bétonnage afin de pouvoir stocker de petites quantités d'éléments de coffrage.

Il existe différentes possibilités de réaliser des joints de construction, en faisant la distinction entre les coffrages perdus et les coffrages normaux. Les coffrages perdus restent dans l'élément de construction après le bétonnage et ne sont décoffrés. Différents matériaux ou éléments peuvent être utilisés à cet effet. En règle générale, ils sont utilisés comme coffrages par étapes, l'élément de coffrage devant permettre la pénétration de l'armature longitudinale. Comme pour les éléments de coffrage normaux, l'élément doit résister à la pression de bétonnage pendant le coulage.

### 3.2 Objectifs de développement

L'objectif principal du développement du nouvel élément de coffrage est la conception d'un élément qui n'entraîne pas de déficit de résistance à l'effort tranchant par rapport aux dalles en béton armé non armées à l'effort tranchant. La valeur de référence est donc la résistance à l'effort tranchant du béton pur d'une dalle en béton armé. Cela doit être réalisé au moyen d'un renforcement minimal de l'effort tranchant sous forme d'une armature ondulée dans l'élément de coffrage. Grâce à une conception optimale de l'armature et à l'effet porteur combiné de l'armature d'effort tranchant et de la denture de fissure, la résistance à l'effort tranchant doit être augmentée localement par l'installation de l'élément de coffrage.

Lors du développement de l'élément de coffrage, d'autres facteurs sont en outre déterminants pour l'obtention d'un produit réussi :

- **Facilité d'utilisation lors de l'installation** : l'élément de coffrage doit être facile à monter sur le coffrage de dalle, la pénétration du fer doit se faire sans problème et il ne doit pas nécessiter d'instructions compliquées.
- **Un mode de support transparent** : De plus, le mode de support de l'élément doit être clairement communicable. Les ingénieurs civils doivent être en mesure d'identifier et d'attribuer clairement le mode de charge à l'aide de la seule géométrie des différents éléments. Les résultats obtenus lors d'essais à grande échelle doivent étayer les objectifs de la conception. L'armature d'effort tranchant installée dans l'élément de coffrage doit remédier à la diminution de la résistance à l'effort tranchant causée par l'élément.
- **Durabilité** : après le bétonnage, l'élément de coffrage développé reste comme coffrage perdu dans la dalle en béton armé. Il faut donc pouvoir garantir la durabilité de l'élément.
- **Compétitivité** : il faut viser un développement compétitif de l'élément de déconnexion. La rémunération monétaire peut être légèrement supérieure à celle des produits concurrents en raison des avantages qu'ils offrent.

### 3.3 Premiers pas

En collaboration avec le partenaire industriel, différents prototypes d'éléments de coffrage ont été développés. Après plusieurs étapes de développement, la structure suivante s'est avérée être la plus prometteuse : L'imbrication entre les deux étapes de bétonnage est assurée au moyen d'un treillis métallique à mailles larges, mis en forme de manière appropriée. Un filet en matière synthétique à mailles serrées, qui s'appuie étroitement sur le treillis en acier et être facilement percé par des fers d'armature, sert de limite au béton coulable. Les deux côtés sont fermés par une baguette en plastique dans laquelle sont fixés le treillis en acier et le treillis en plastique. Dans la baguette en plastique est en outre prévue une fixation pour une armature de force transversale qui doit assumer deux tâches : Premièrement, l'armature en forme de boucle confère à l'élément de coffrage la stabilité nécessaire, notamment lors du montage et du bétonnage. A l'état final, elle sert à remédier à l'affaiblissement de la résistance à l'effort tranchant qui est inévitablement lié à l'étape de bétonnage.

Le partenaire industriel a mis à disposition huit types de grilles en acier de différentes géométries, ainsi que des barres et des filets en plastique. Les prototypes d'éléments de coffrage fabriqués à partir de ces éléments ont servi à vérifier la qualité de la formation des comes ainsi que la denture nécessaire. La documentation détaillée de ces premiers essais est présentée en annexe A.

Après l'entoilage du treillis en acier avec le filet en plastique, les éléments de coffrage ont été installés dans de petites éprouvettes. Le bétonnage d'un seul côté a permis de contrôler visuellement la formation de l'ergot après le durcissement du béton. Le bétonnage de la deuxième étape a servi à la formation de la denture, dont la qualité n'a pu être contrôlée qu'après la rupture des éprouvettes. La rupture contrôlée a été réalisée au moyen d'un essai de flexion en trois points ; les photographies présentées dans la figure 2 a) à d) permettent de mieux comprendre. Ces essais ont servi simultanément à déterminer la résistance à la traction par flexion du béton pur ou par l'intermédiaire de l'élément de coffrage et à évaluer la formation de comes (denture) par l'élément de coffrage. L'évaluation des résultats des essais a montré que le type de treillis 6 se distingue par une formation optimale des comes et une résistance à la traction maximale ; il a donc été choisi pour le développement ultérieur.

Après les premières évaluations des essais, divers petits essais ont encore été réalisés sur les échantillons existants. La découpe des ergots a permis, grâce au contrôle visuel, tirer des conclusions sur la répartition des grains dans les ergots formés. De plus, les baguettes en plastique mises à disposition par le partenaire industriel ont été intégrées dans la première série d'éprouvettes afin d'examiner la ventilation pendant le bétonnage. En les découpant ultérieurement, il est possible de contrôler les cavités sous-jacentes, ce qui permet d'évaluer la garantie d'une aération complète.

Des informations plus détaillées sur les essais à petite échelle à l'annexe B.

a)



b)



c)



d)



Figure 2 : Grille de type 6, a,b) après l'essai de flexion, c) répartition des grains dans les cames, d) avant l'essai de flexion.

### 3.4 Prototype

Le prototype développé en collaboration avec le partenaire industriel a une hauteur de 30 cm et une longueur d'un mètre. Les profilés en plastique placés en haut et en bas ont une largeur de 73 mm et une hauteur de 35 mm ; ils sont fabriqués par le partenaire industriel spécialisé dans la coulée continue. En

Figure 3 a), la coupe transversale et la vue sont représentées ;

La figure 3 b) montre une représentation axonométrique.

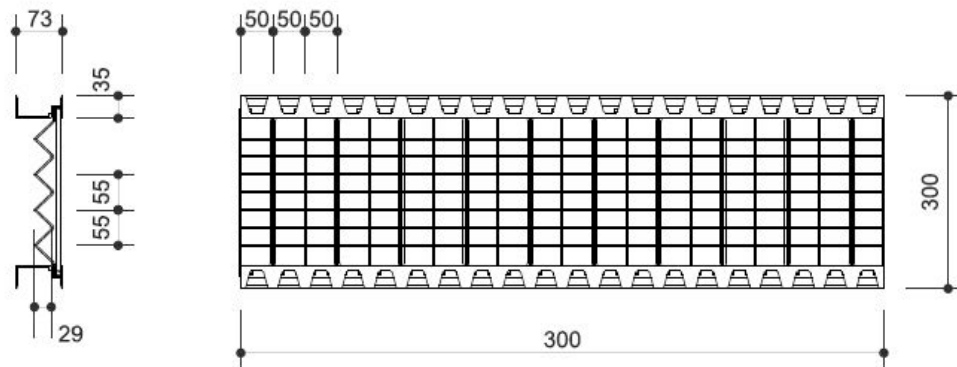
Entre les profilés en plastique est inséré un treillis métallique soudé par points, qui présente un diamètre de fil de 2,5 mm et une largeur de maille de 50 mm. Les treillis métalliques sont mis en forme à l'aide d'outils de pressage, ce qui permet de créer la géométrie d'engrènement nécessaire du joint en béton. De plus, les treillis métalliques sont recouverts d'un filet en fibres de verre qui, malgré sa grande résistance à la fissuration, peut être facilement transpercé par des fers d'armature. Les dimensions exactes du treillis métallique sont indiquées à l'annexe A.

Les profilés en plastique disposent d'une rainure supplémentaire dans laquelle l'armature en boucle peut être insérée. Celle-ci a la fonction d'une armature d'effort tranchant limitée localement et doit remédier à la diminution de la résistance à l'effort tranchant due au joint de construction. L'armature ondulée a été conçue pour une épaisseur de dalle de 30 cm ; elle a un diamètre de 8 mm, une distance entre les fers verticaux de 100 mm et une hauteur de 240 mm.

Le dimensionnement de l'armature d'effort tranchant nécessaire s'effectue sur la base des relations établies par les différentes normes pour déterminer l'armature d'effort tranchant minimale en tenant compte de l'effet porteur favorable de la plaque.



a)



b)

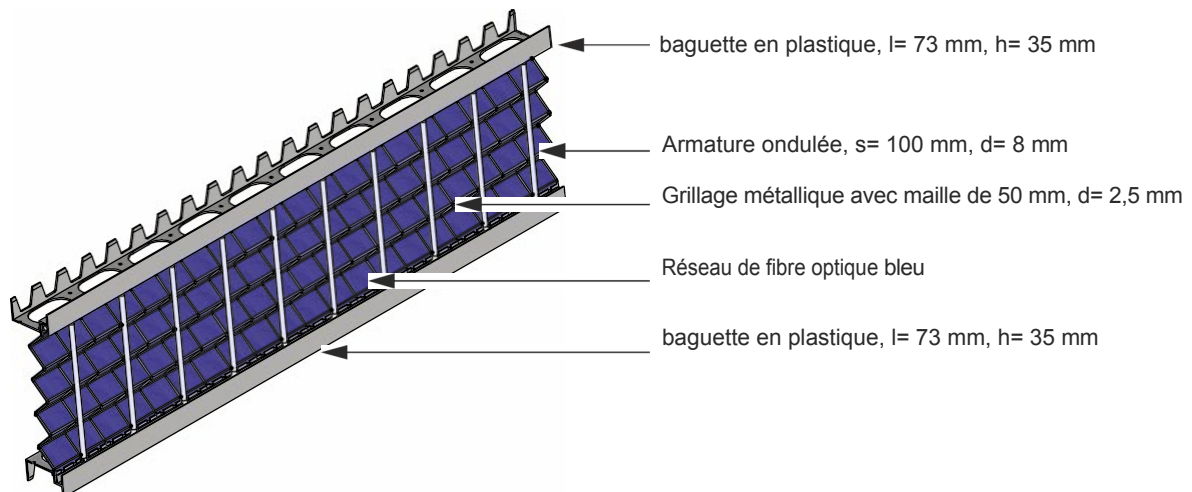


Figure 3 : a) Dimensions de l'élément de coffrage, b) Inscription de l'élément de coffrage.

## 4 Dimensionnement du corps d'essai

### 4.1 Conception

Un échelonnement au moyen d'un joint de construction et l'utilisation de l'élément de coffrage qui en découle auront un effet sur la résistance à l'effort tranchant en raison de l'impossibilité de former une denture naturelle. Ceci doit être vérifié à l'aide d'essais de défaillance de l'effort tranchant classique. La conception prévoit un corps d'essai avec une zone d'essai disposée des deux côtés pour un essai de force transversale, qui sont réalisés séparément dans le temps. Les zones d'essai sont disposées dans les deux porte-à-faux du corps d'épreuve monté comme un simple soufflet, voir à cet effet la figure 4. Le système statique correspondant est le porte-à-faux déterminé statiquement. Le banc d'essai se compose d'une introduction de force à une distance de la portée de cisaillement  $a$  par rapport à l'appui positif. L'appui négatif se trouve dans la zone arrière. Cette disposition a permis de tester chaque éprouvette d'un côté jusqu'à la rupture, puis de la faire pivoter de 180 degrés autour de l'axe vertical pour la deuxième exécution de l'essai. La zone entre les appuis ne fait pas partie de la zone d'essai ; elle assure le serrage nécessaire du bras en porte-à-faux et donc de la zone d'essai ; celle-ci est équipée d'une armature d'effort tranchant correspondante pour la protéger contre une défaillance de l'effort tranchant.

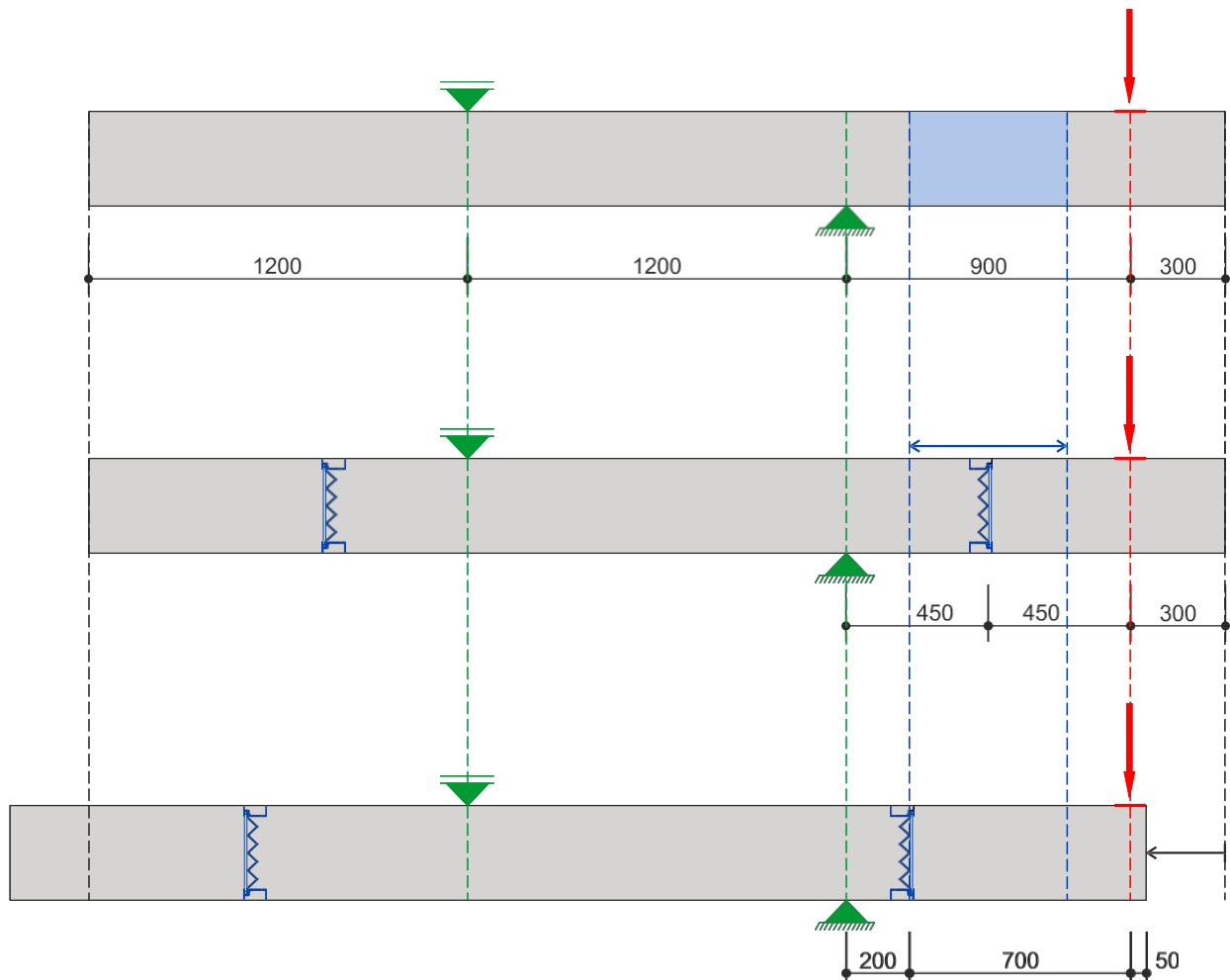


Figure 4 : Conception de l'essai.

L'élément central de la conception de l'essai consiste à garantir un positionnement aussi libre que possible de l'élément de coffrage déjà bétonné, voir à ce sujet les illustrations de la figure 4. La raison en est le comportement porteur fragile de la rupture par effort tranchant. La fissuration lors de la rupture par effort tranchant se forme à partir d'un point d'amorçage des deux côtés en direction de l'axe de la poutre. Pour pouvoir détecter l'influence effective de l'élément de coffrage sur la résistance à l'effort tranchant, il faut que la position de l'élément de coffrage corresponde à l'endroit d'initiation de la fissure lors de l'essai proprement dit. A l'aide de quatre essais de référence, ce point peut être déterminé à l'avance, ce qui permet d'ajuster exactement la position de l'élément de coffrage avant l'essai proprement dit. Pour garantir la plus grande liberté de choix possible en matière de positionnement, les éléments d'essai présentent un prolongement correspondant des deux côtés ; la disposition de l'armature d'effort tranchant dans la zone centrale est également décalée en conséquence par rapport aux appuis.

## 4.2 Dimensions

En collaboration avec le partenaire industriel, une épaisseur de panneau de 30 cm, souvent rencontrée dans la pratique, a été choisie pour la première série d'essais. La largeur des panneaux a été fixée à 100 cm, voir la représentation inférieure de la figure 5. La hauteur de construction de l'élément de coffrage est donnée en raison de l'épaisseur de panneau choisie. Le cantilever et la zone entre les appuis ont été dimensionnés à quatre fois l'épaisseur de l'élément, ce qui correspond à une longueur de 120 cm. Avec ces dimensions, les corps d'essai peuvent être soumis à une contrainte de cisaillement de  $3 h$ , ce qui correspond à une position de charge critique au cisaillement, voir la représentation supérieure de la figure 5.

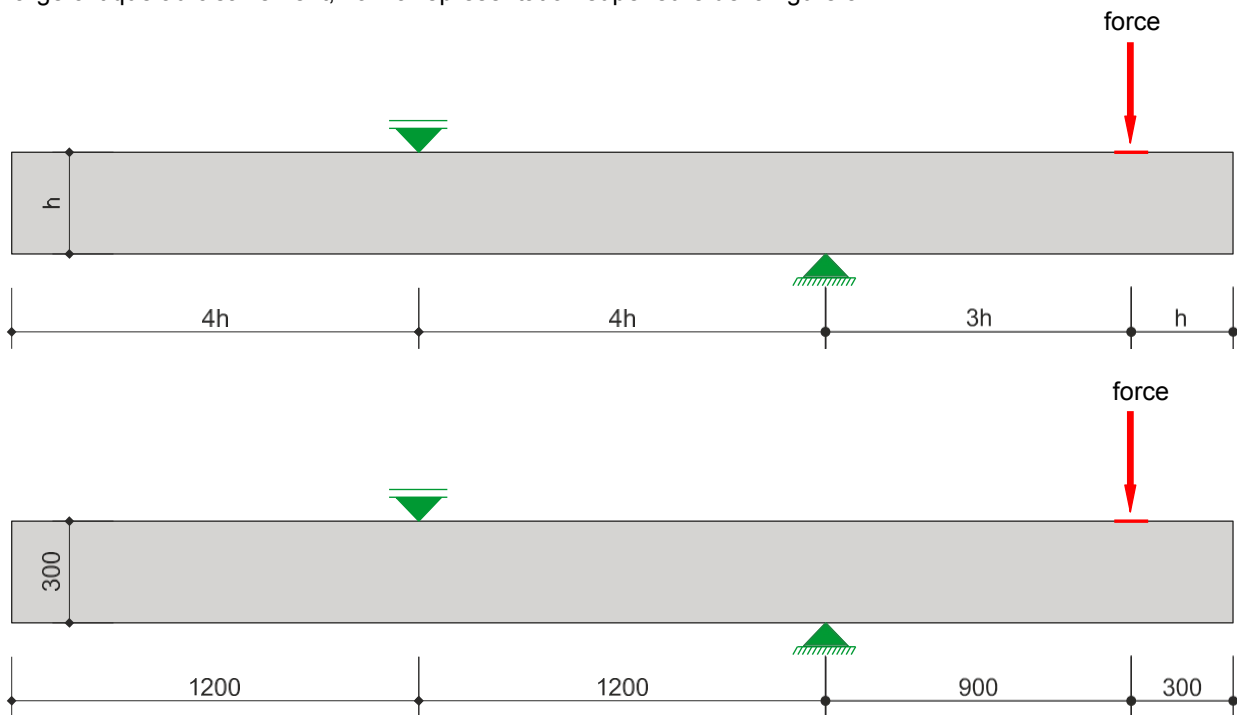


Figure 5 : dimensionnement des dimensions.

### 4.3 Matériaux

#### Béton

Un béton de construction de type C30/37 avec un diamètre de grain maximal de 32 mm a été choisi. Ce béton présente une résistance caractéristique à la compression cylindrique de 30 N/mm<sup>2</sup> et une résistance caractéristique à la compression cubique de 37 N/mm<sup>2</sup>. La résistance au cisaillement du béton peut être déduite par calcul de la résistance à la compression cylindrique avec une valeur de 1,65 N/mm<sup>2</sup>. Pour le dimensionnement des éprouvettes, la résistance à la compression est portée au niveau de la valeur moyenne en augmentant la résistance caractéristique à la compression cylindrique de 8 N/mm<sup>2</sup> conformément à la norme SIA 262:2013. On peut donc admettre une résistance à la compression moyenne de 38 N/mm<sup>2</sup> pour les éprouvettes. Les principaux paramètres sont résumés dans le tableau 1.

Béton	$f_{ck}[N/mm^2]$	$f_{cm}[N/mm^2]$	$\tau_{ck}[N/mm^2]$	$\tau_{cm}[N/mm^2]$	$D_{max}[mm]$
C30/37	30	30+8	1.65	1.85	32

Tableau 1 : Propriétés du type de béton C30/37.

#### Acier d'armature

Pour l'armature de flexion, on utilise un acier d'armature B500B qui présente une limite d'élasticité de 500 N/mm<sup>2</sup>, voir tableau 2.

Acier d'armature	$f_{sk}[N/mm^2]$	Rapport $f_t/f_{sk}$
B500B	500	$\geq 1.08$

Tableau 2 : Propriétés de l'acier d'armature B500B.

### 4.4 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est déterminée à l'aide du contenu de l'armature mécanique, voir relation (2). Pour s'assurer qu'une ductilité suffisante de l'élément de construction est garantie, le rapport entre la hauteur de la zone de compression et la hauteur statique  $x/d_v$ , est fixé à la valeur 0.3 limitée.

$$M_{Rk} = A_{s,vor} \cdot f_{sk} \cdot d_v \cdot \left(1 - \frac{\omega}{2}\right) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{A_{s,vor} \cdot f_{sk}}{b \cdot d_v \cdot f_{cm}} \quad (2)$$

La hauteur de la zone de compression choisie permet de déterminer la surface d'armature maximale conformément à la relation (3).

$$A_{s,max} = \frac{\frac{x}{d_v} \cdot b \cdot f_{cm} \cdot 0.85}{f_{sk}} \quad (3)$$

L'armature de flexion peut être déterminée en tenant compte de la surface maximale d'armature. Afin de garantir une disposition symétrique de l'armature, 15 fers d'armature d'un diamètre de 20 mm sont sélectionnés, voir à ce sujet la composition dans le tableau 3.

$As_{max} [N/mm^2]$	$d_s [mm]$	$Stk[-]$	$As_{vor}[N/mm^2]$
5019	20	15	4712

Tableau 3 : Armature de flexion selon le prédimensionnement.

Avec l'armature de flexion choisie, la résistance à la flexion prédite est de 539,6 kNm, conformément au tableau 4.

$\omega[-]$	$M_{Rk}[kNm]$
0.238	<b>539.6</b>

Tableau 4 : Résistance à la flexion selon le prédimensionnement.

#### 4.5 Résistance à l'effort tranchant

La résistance à l'effort tranchant des éprouvettes est prédimensionnée selon le modèle de la norme SIA 262:2013 conformément au chiffre 4.3.3.2 pour les éléments de construction sans armature d'effort tranchant. Ceci est déterminant pour le dimensionnement de l'ensemble du banc d'essai et en particulier des vérins hydrauliques, en tenant compte des variations correspondantes.

La résistance à l'effort tranchant est déterminée selon le modèle pour la section de contrôle fictive éloignée de  $d_v/2$  de l'introduction de l'effort. La résistance à l'effort tranchant pour les éléments de construction sans armature d'effort tranchant selon SIA 262 peut être calculé de la manière suivante :

$$V_{Rk} = k_d \cdot \tau_{cm} \cdot d_v \cdot b \quad (4)$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_s \cdot d_v \cdot k_g} \quad (5)$$

$$k_g = \frac{48}{16 + d_{\max}} \quad (6)$$

Comme l'armature de flexion reste dans le domaine élastique, la relation suivante s'applique à l'allongement  $\varepsilon_s$  :

$$\varepsilon_s = \frac{f_{sk}}{E_s} \cdot \frac{M_{Ek}}{M_{Rk}} \quad (7)$$

La résistance à l'effort tranchant selon la norme SIA 262 dépend de l'allongement  $\varepsilon_s$  et donc aussi du moment de flexion agissant  $M_{Ek}$ , qui peut être assimilé dans le cas présent au terme  $V_{Rk} \cdot l$ . La représentation implicite du calcul de la résistance à l'effort tranchant peut être résolue itérative. Il en résulte la résistance à l'effort tranchant indiquée dans le tableau 5.

$V_{Rk}[kN]$
362

Tableau 5 : Résistance à l'effort tranchant selon le prédimensionnement.

## 5 Production

Au total, cinq éprouvettes ont été fabriquées selon la figure 6, avec des zones d'essai disposées aux deux extrémités, voir figure 6. Les dix essais qui en résultent sont conçus différemment de la manière suivante (les éprouvettes sont désignées par les inscriptions P 1.1, P 1.2, P 2.1... P 5.2) : P 1 et P 2 sont bétonnés de part en part et ne présentent donc pas de joint de construction ; ils servent, avec les désignations P 1.1, P 1.2, P 2.1 et P 2.2, d'essais de référence d'une part pour la vérification de la résistance à l'effort tranchant pronostiquée et d'autre part pour la détermination du lieu d'amorçage de la fissure.

Les éprouvettes P 3.1, P 3.2 et P 4.1 contiennent l'élément de coffrage développé, mais sans l'armature en boucle pour la protection contre les efforts tranchants. Pour ces trois éprouvettes, on s'attend à une charge admissible légèrement inférieure à celle des essais de référence. Les trois autres éprouvettes P 4.2, P 5.1 et P 5.2, contrairement à P 3.1, P 3.2 et P 4.1, un blocage des forces transversales au moyen d'une armature en boucle. Par rapport aux essais de référence, on s'attend ici à une résistance à l'effort tranchant au moins aussi élevée. Un résumé est présenté dans le tableau 6.

Eprouvettes	Conception du joint de construction
P 1.1, P 1.2, P 2.1, P .2	Bétonné sans étape.
P 3.1, P 3.2, P 4.1	Etagé avec élément de coffrage sans armature de gaine.
P 4.2, P 5.1, P 5.2	Etagé avec élément de coffrage, y compris armature de boucle.

Tableau 6 : Aperçu des échantillons.



Figure 6 : Epreuve après retrait des coffrages latéraux.

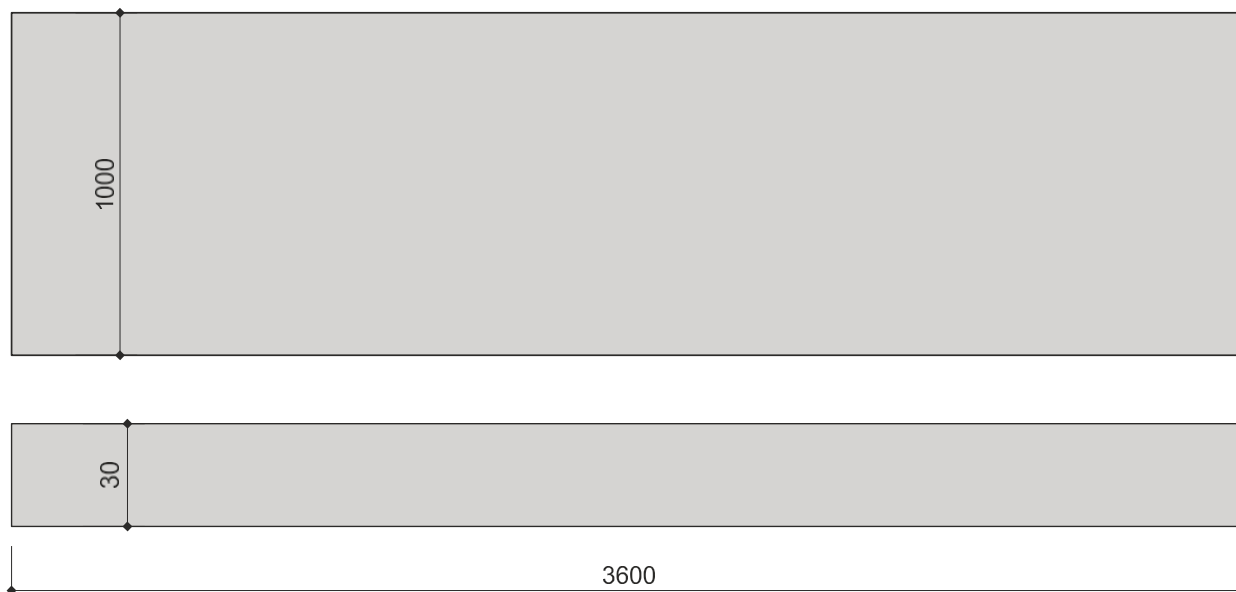
### 5.1 Dimensions

Comme le montre la figure 7, toutes les éprouvettes ont été fabriquées à l'identique avec les dimensions suivantes : Longueur de 360 cm, largeur de 100 cm et épaisseur de panneau de 30 cm. Les éléments de coffrage ont été placés à 75 cm du bord du panneau. Avec ces dimensions, le poids total d'une éprouvette est de 2,7 tonnes, voir tableau 7 et figure 7 a) et b).

Longueur	360 cm
Largeur	100 cm
Force	30 cm
Poids	2.7 t

Tableau 7 : Dimensions des éprouvettes.

a)



b)

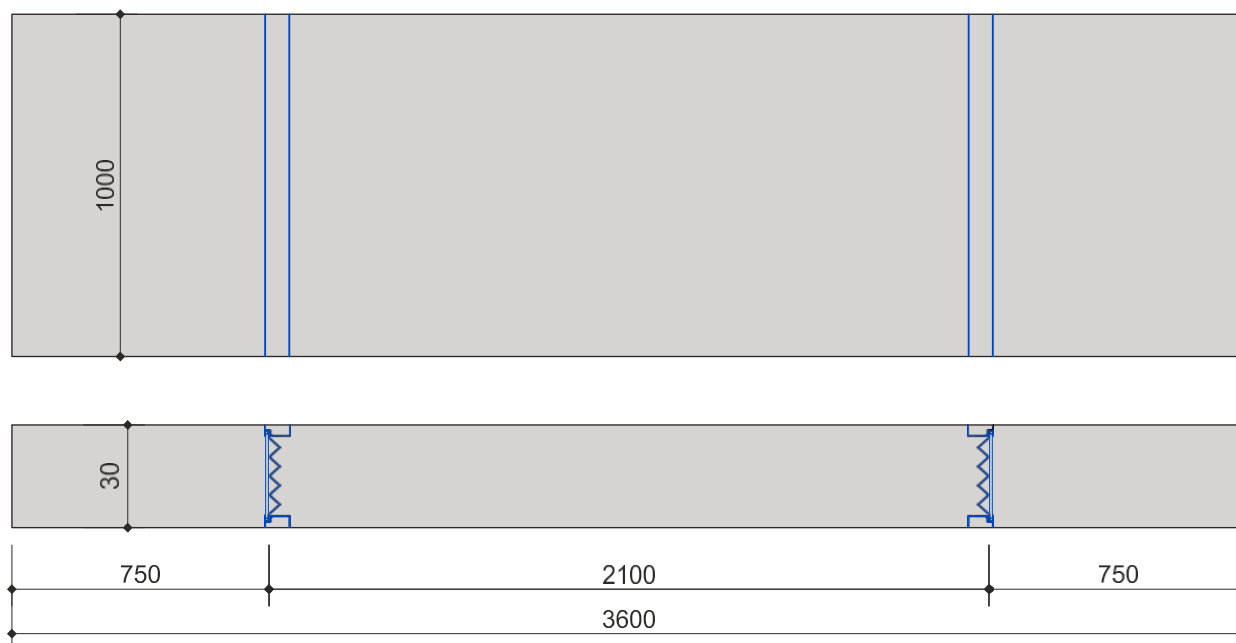


Figure 7 : Dimensions des éprouvettes, a) essais de référence, b) éprouvettes avec coffrage sur l'exemple P5.



## 5.2 Armature de flexion et d'effort tranchant

L'armature de flexion a été posée de manière identique pour tous les éléments de frappe. Dans chaque élément de frappe, 15 fers d'armature d'un diamètre de 20 mm ont été utilisés. Pour garantir l'ancrage, les fers d'armature sont munis d'un crochet d'extrémité à chaque extrémité.

Pour des raisons de sécurité, les éléments de frappe sont renforcés dans leur partie centrale par une armature d'effort tranchant, voir Figure 8 et Figure 9. Cette mesure vise à éviter toute défaillance accidentelle de l'effort tranchant en dehors de la zone d'essai proprement dite, entre les deux appuis. L'armature de l'élément de test est représentée sur la figure 8 à l'exemple de l'élément de test P3. Le tableau 8 présente un récapitulatif du ferrailage mis en place pour chaque élément de test.

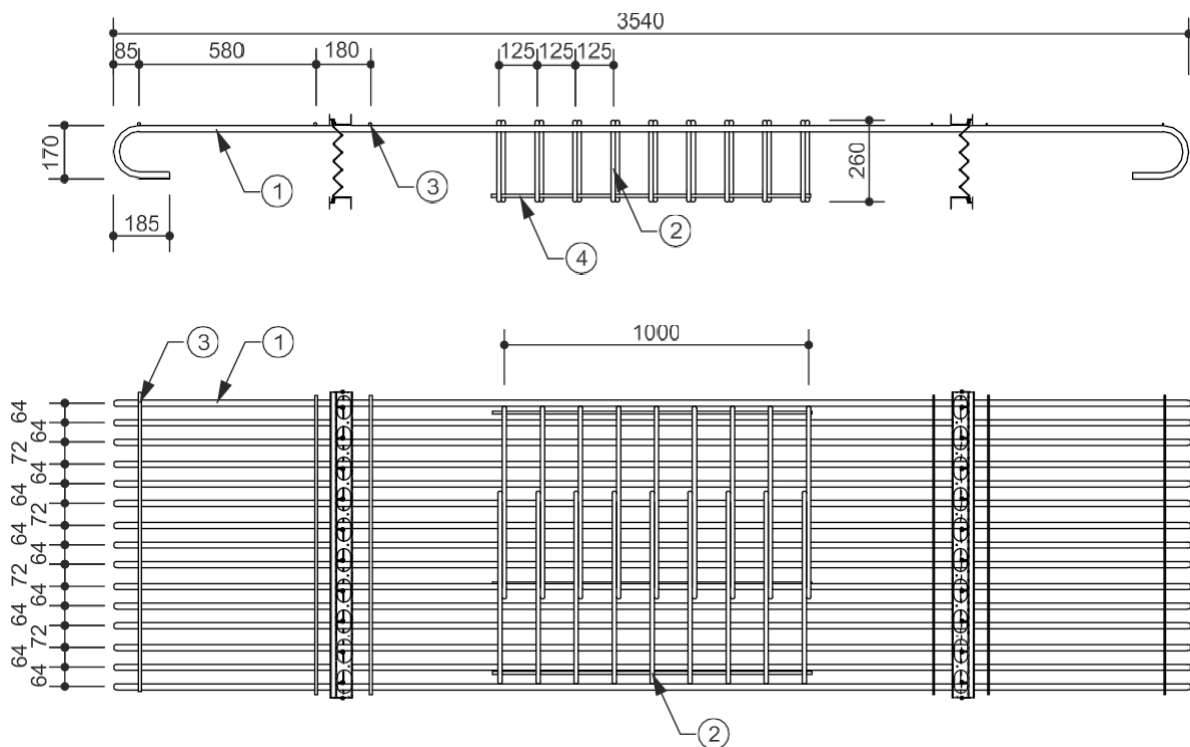


Figure 8 : Armature de flexion et d'effort tranchant des éléments de test dans l'exemple P3.

Pos.	d [mm]	pièce	Description
1	20	15	Armature de flexion avec 2 x crochets d'extrémité
2	14	18	Etrier de force transversale, l= 630 mm, h= 260 mm
3	10	6	Fer de roulement, l= 980 mm
4	10	4	Fer de stockage, l= 1050 mm

Tableau 8 : Armature de flexion et d'effort tranchant des éléments de test.

a)



b)



Figure 9 : a, b) Epreuve après la mise en place de l'armature et des éléments de coffrage.

### 5.3 Matériaux

#### Béton

Le béton a été fourni par l'entreprise Holcim AG à Birsfelden. Conformément au pré-dimensionnement, un béton de qualité C300 (CAN C) C30/37 et d'une granulométrie de 32 mm a été préparé. Pour limiter la résistance à la compression du béton, on a ajouté  $10 \text{ kg/m}^3$  de ciment en moins au mélange de béton, en accord avec le responsable du laboratoire de l'entreprise Holcim SA.

Béton selon le bon de livraison : **C300 (NPK C) C30/37, XC4, XF1 (CH), béton pour grue C3 32**

#### Acier d'armature

Le prédimensionnement se base sur un acier d'armature de qualité B500B ; l'armature a été fournie par la société Debrunner AG.

Acier d'armature selon le bulletin de livraison : **B500B, nervuré**

### 5.4 Fabrication

La fabrication des éprouvettes s'est déroulée en plusieurs étapes. Tout d'abord, un fond de coffrage a été réalisé, suivi du montage des coffrages latéraux. Ensuite, le coffrage a été posé et les éléments de coffrage ont été installés. Le bétonnage des éléments d'essai a été effectué selon les étapes correspondantes par les éléments de coffrage. Lors de la première étape, les éprouvettes P1 et P2 bétonnées de part en part ainsi que les zones centrales des autres éprouvettes ont été bétonnées entre les éléments de coffrage. Dans la deuxième étape, les zones extérieures entre le bord et les éléments de coffrage ont été bétonnées.

Le béton a été à l'école supérieure par l'entreprise Holcim AG Birsfelden à l'aide d'un camion-bétonnière, puis mis en place à l'aide d'un camion-grue de l'entreprise Grollimund AG de Muttens avec l'aide d'un silo à béton et compacté à l'aide d'une aiguille vibrante.

Les figures 10 a) à d) des impressions de la fabrication.

## Données d'exécution

Étape 1	Réalisation du coffrage	Semaines 23, 2023
Étape 2	Éprouvettes Armature et mise en place des éléments de coffrage	Semaines 24 et 25, 2023
Étape 3	Bétonnage 1ère étape	28.06.2023
Étape 4	Bétonnage 2ème étape	03.07.2023

a)



b)



c)



d)



Figure 10 : a) Epreuve avant le bétonnage, b) Bétonnage de la première étape, c) Coffrage après le bétonnage de la première étape, d) Bétonnage de la deuxième étape.



## 6 Essais de matériaux

### 6.1 Acier d'armature

Un acier d'armature de qualité B500B est utilisé. Pour un pronostic exact de la résistance à la flexion, les propriétés des matériaux de l'armature de flexion sont déterminées au moyen d'échantillons de traction. Pour ce faire, huit échantillons de traction ont prélevés sur trois barres d'armature. Le module d'élasticité, la limite d'écoulement, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture ont été déterminés pour chacun des huit échantillons de traction. Les essais de traction ont été réalisés sur la machine d'essai universelle Amsler avec une capacité de force de 1 MN. Les huit échantillons de traction sont représentés sur la figure 11 a) et b) avant et après l'essai. Les caractéristiques des matériaux déterminées sont indiquées dans le tableau 9. L'analyse des résultats des essais est présentée dans le tableau 10.

a)



b)



Figure 11 : Armature de flexion d= 20 mm, a) avant les essais de traction, b) après les essais de traction.

Désignation	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	Valeur moyenne
Module d'élasticité [kN/mm <sup>2</sup> ]	214	204	198	189	201	209	207	205	203
$f_{s0.2m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	541	522	550	544	539	543	552	555	543
$f_{tm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	639	638	647	641	651	639	651	651	645
$\epsilon_{u.m}$ [%]	15.8	16.9	14.2	14.6	15.2	15.5	13.0	16.3	15.2

Tableau 9 : Armature de flexion d= 20 mm : résultats et évaluation des huit échantillons de traction.

Désignation	Caractéristiques	Valeur
Module d'élasticité	Valeur moyenne	$E = 203 \text{ kN/mm}^2$
Limite d'écoulement	Fractile à 5%	$f_{s0.2k} = 518 \text{ N/mm}^2$
Résistance à la traction	Fractile à 5%	$f_{tk} = 630 \text{ N/mm}^2$
Allongement à la rupture	Fractile à 10%	$\epsilon_{uk} = 12,8 \%$

Tableau 10 : Armature de flexion d= 20 mm : valeurs caractéristiques.

Les caractéristiques des matériaux de l'armature en boucle sont également disponibles. Les caractéristiques ont été déterminées à l'aide d'essais de traction sous la forme du diagramme contrainte-allongement représenté à la figure 12.

suspense [N/mm<sup>2</sup>]

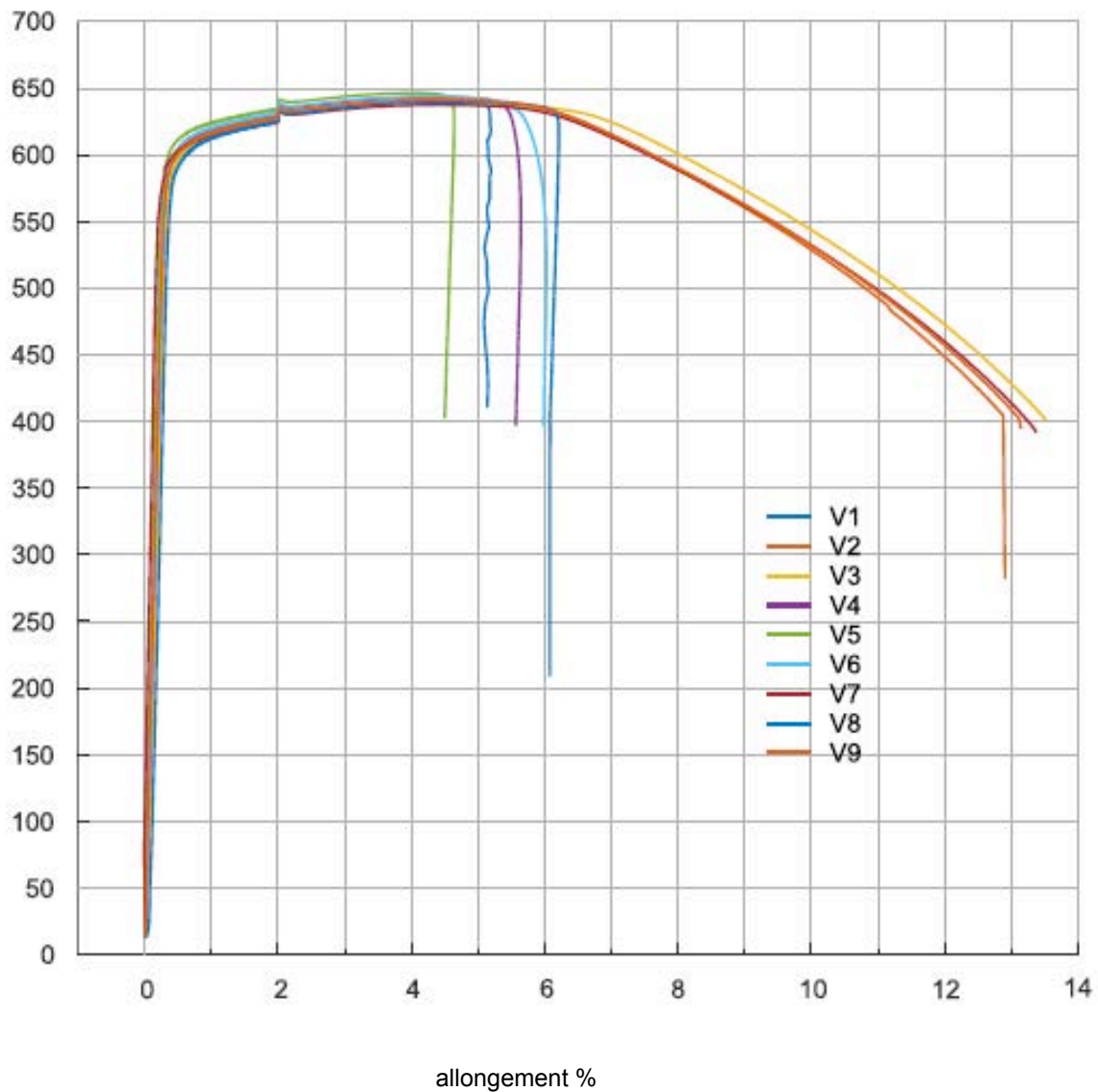


Figure 12 : Armature en boucle : diagramme contrainte-déformation des essais de traction.

Les grandeurs caractéristiques obtenues à partir des neuf essais sont résumées dans le tableau 11.

Désignation	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	Valeur moyenne
Module d'élasticité [kN/mm <sup>2</sup> ]	193	182	206	211	217	217	254	185	210	208
$f_{y,0.2,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	596	606	596	602	610	604	600	592	600	601
$f_{u,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	640	640	639	643	647	644	638	640	642	641
$\epsilon_{u,m}$ [%]	4.3	4.4	4.4	4.2	4.1	4.3	4.3	4.6	4.5	4.4
$\epsilon_{uk,act}$ [%]										4.0
$f_{sk,act}$ [N/mm <sup>2</sup> ]										586.7
$f_{uk,act}$ [N/mm <sup>2</sup> ]										634.2

Tableau 11 : Armature à boucles d= 8 mm : résultats et évaluation des neuf échantillons de traction.

Les valeurs caractéristiques de l'armature en boucles peuvent être déterminées à partir de ces données dans le tableau 12.

Désignation	Caractéristiques	Valeur
Module d'élasticité	Valeur moyenne	$E = 208 \text{ kN/mm}^2$
Limite d'écoulement	Fractile à 5%	$f_{sk,act} = 586.7 \text{ N/mm}^2$
Résistance à la traction	Fractile à 5%	$f_{uk,act} = 634.2 \text{ N/mm}^2$
Allongement à la rupture	Fractile à 10%	$\epsilon_{uk,act} = 4.0 \%$

Tableau 12 : Armature en boucle d= 8 mm : valeurs caractéristiques.

## 6.2 Béton

En même temps que les étapes de bétonnage, des éprouvettes en béton ont été fabriquées sous forme de cubes et de cylindres selon le tableau 13, afin de pouvoir déterminer la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage du béton. Les cubes et les cylindres ont été décoffrés deux jours après le bétonnage, puis stockés dans un bain d'eau jusqu'au moment de l'essai. Les échantillons de béton ont été testés en plusieurs séries, ce qui permet de surveiller la résistance à la compression et à la traction jusqu'à la fin de tous les essais. Les figures 13 a) et b) montrent une sélection d'éprouvettes de compression de cube et de traction de fissure avant et après la réalisation des essais.

La machine d'essai universelle Veri- test, d'une capacité de force de 3 MN, a été utilisée pour effectuer les essais de compression et de traction par fendage. Une liste des échantillons présentée dans le tableau 13. Tous les résultats des essais de béton sont présentés dans les tableaux 14 à 17.

a)



b)



Figure 13 : a et b) Epreuves pour la détermination des résistances à la compression et à la traction par fendage.

	Échantillons de pression	Échantillons de traction par fente
Étape 1	9	3
Étape 2	6	4

Tableau 13 : Aperçu du nombre d'échantillons de compression et de fendage.

Essais de pression au cube 1ère étape							
Désignation	Date de fabrication	B	H	L	A	Date de contrôle	Résistance à la pression du cube
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
W1	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	28.1
W2	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	27.8
W3	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	27.2
W4	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	26.6
W5	28.06.2023	150	150	150	22500	31.07.2023	26.8
W6	28.06.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	28.3
W7	28.06.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	26.6
W8	28.06.2023	150	150	150	22500	21.09.2023	34.1
W9	28.06.2023	150	150	150	22500	21.09.2023	34.8
Valeur moyenne							28.9

Tableau 14 : Première étape de bétonnage : résultats des essais de pression au cube.

Essais de traction par fendage 1ère étape						
Désignation	Date de fabrication	D	H	Fente A	Date de contrôle	Résistance à la traction par fente
		[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
Z1	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.6
Z2	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.2
Z3	28.06.2023	150	300	45000	31.07.2023	2.6
Valeur moyenne						2.5

Tableau 15 : Première étape de bétonnage : résultats des essais de traction par fendage.

Essais de pression au cube 2ème étape							
Désignation	Date de fabrication	B	H	L	A	Date de contrôle	Résistance à la pression du cube
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
W1	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	36.5
W2	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	35.9
W3	03.07.2023	150	150	150	22500	03.08.2023	36.4
W4	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	41.7
W5	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	44.6
W6	03.07.2023	150	150	150	22500	31.08.2023	43.7
Valeur moyenne							39.8

Tableau 16 : Deuxième étape de bétonnage : résultats des essais de pression au cube.



Essais de traction en fente 2ème étape						
Désignation	Date de fabrication	D	H	Fente A	Date de contrôle	Résistance à la traction par fente
		[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
Z1	03.07.2023	150	300	45000	03.08.2023	3.0
Z2	03.07.2023	150	300	45000	03.08.2023	3.2
Z3	03.07.2023	150	300	45000	21.09.2023	3.6
Z4	03.07.2023	150	300	45000	21.09.2023	3.3
Valeur moyenne						3.3

Tableau 17 : Deuxième étape de bétonnage : résultats des essais de traction par fendage.

Le 22.09.2023, des essais de compression supplémentaires ont été réalisés avec un marteau d'essai pour béton Schmidt. Il convient de noter que les résultats du marteau d'essai du béton présentent certaines divergences par rapport aux essais de pression au cube. C'est pourquoi est prévu de réaliser ultérieurement des carottages qui seront ensuite soumis à des essais supplémentaires. Cela permettra d'évaluer plus précisément l'évolution de la résistance à la compression du béton.

## 7 Prévisions

### 7.1 Résistance à la flexion

Sur la base des essais de matériaux réalisés au chapitre 6.1, il est possible de mettre à jour les prévisions de résistance à la flexion de l'élément de frappe conformément au tableau 18 :

$\omega$ [-]	$M_{R,0.2k}$ [kNm]
0.426	<b>524</b>

Tableau 18 : Résistance à la flexion prédite des échantillons.

### 7.2 Résistance à l'effort tranchant

Pour établir le pronostic de la résistance à l'effort tranchant, il faut faire la distinction entre les éprouvettes bétonnées et les éprouvettes avec élément de coffrage intégré. Pour les éprouvettes bétonnées, il est possible d'établir un pronostic relativement précis sur la base des modèles disponibles et des essais de matériaux réalisés dans le chapitre 6.2, alors que pour les éprouvettes avec élément de coffrage, l'absence de modèle ne permet qu'une estimation.

Pour les éprouvettes bétonnées, la résistance à l'effort tranchant peut être calculée non seulement sur la base de la norme SIA, comme expliqué au chapitre 2.3, mais aussi sur la base du modèle CSCT. Pour cela, le béton de la première étape de bétonnage est attribué à la classe de résistance C20/25 - C25/30 selon la norme DIN EN 13791.

Il en résulte une résistance à l'effort tranchant au niveau de la valeur moyenne de 316 kN - 340 kN.

$V_{Rm}$ [kN]
316 - 340

Tableau 19 : Résistance prévisionnelle à l'effort tranchant des éprouvettes.

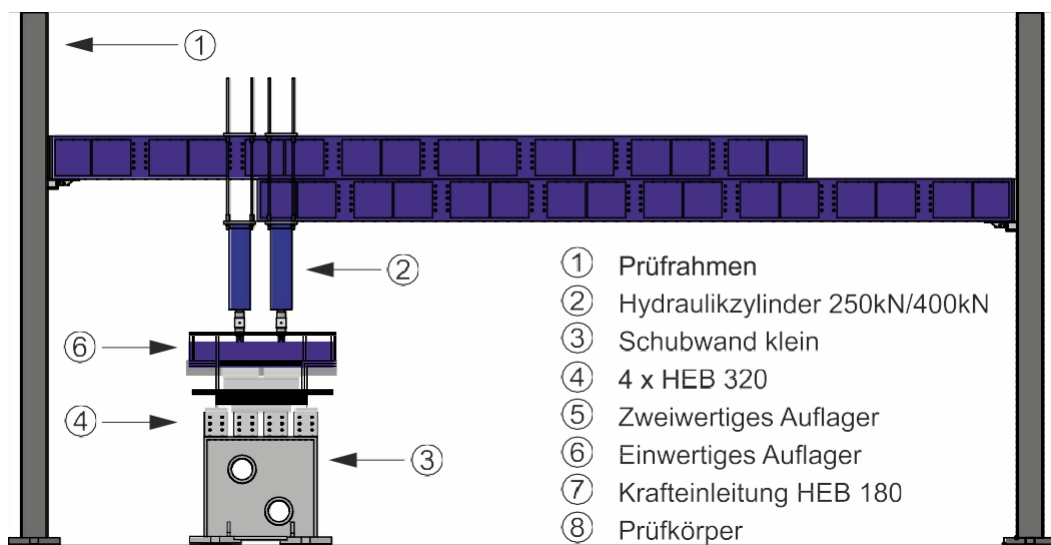
Pour les éprouvettes avec un élément de coffrage sans renforcement de l'effort tranchant, on s'attend à ce que la résistance à l'effort tranchant soit légèrement inférieure. En revanche, la résistance à l'effort tranchant être légèrement plus élevée pour les éprouvettes dotées d'un élément de coffrage avec renforcement de l'effort tranchant.

## 8 Préparation de l'essai

### 8.1 Dispositif expérimental

Le développement du dispositif d'essai s'effectue sur la base d'un modèle virtuel en 3D de l'ensemble de la structure du laboratoire de construction ainsi que des éléments de construction métallique existants ; il est conçu pendant la phase de planification à l'aide du progiciel Inventor d'Autodesk. Le cadre d'essai universel 2 x 400 kN de la figure 14, choisi pour la réalisation des essais, se compose de deux poteaux en acier du profilé laminé HEB 360 d'une hauteur de 6.48 m et d'une traverse réglable en hauteur sur la trame de trous des poteaux de 80 mm, constituée de deux HEM 560 de 10 m de long, reliés par un joint longitudinal. Les deux poteaux sont reliés à la travée de fixation par deux douilles de poussée et des assemblages vissés précontraints, en adhérence et en direction horizontale.

a)



b)

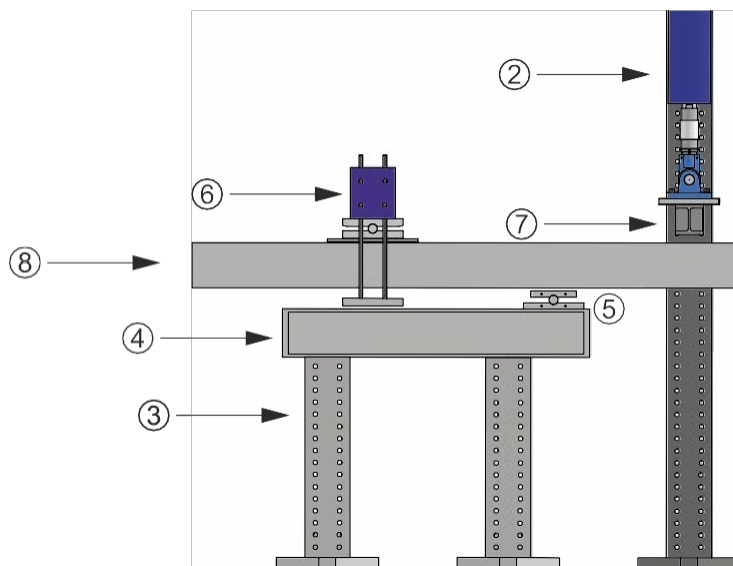


Figure 14 : a) vue frontale du banc d'essai Mst : 1:100, b) vue latérale du banc d'essai Mst : 1:50.

La charge est exercée par deux vérins hydrauliques disposés côte à côte, d'une capacité de force de 400 kN en compression et de 200 kN en traction, qui sont montés sur la traverse de manière à pouvoir être déplacés en continu grâce à un raccord de serrage vissable. Les unités hydrauliques sont chacune équipées d'un capteur de force (basé sur des jauges de contrainte) et d'un capteur de déplacement interne (règle en verre) et peuvent être réglées sur ces deux grandeurs par l'intermédiaire de l'unité de soupape. Les unités hydrauliques à double articulation atteignent une course maximale de 250 mm. Les charges individuelles résultant des deux vérins hydrauliques sont transmises par un profilé laminé de type HEB 180 sur toute la largeur de l'éprouvette sous forme de charge linéaire uniformément répartie.

Pour les appuis, on a utilisé une ossature composée de deux petites parois de cisaillement et de quatre poutres en acier. Les parois de poussée sont reliées à la travée par adhérence, de manière identique aux poteaux, par des douilles de poussée et des assemblages vissés précontraints.

L'appui positif à l'avant, qui est bivalent, est constitué d'une rotule vissée sur les quatre poutres en acier.

Pour l'appui négatif dans la zone arrière, un profilé laminé de type HEB 340 avec huit tiges filetées ( $d = 24$  mm) est vissé vers le bas sur les deux poutres en acier extérieures. La rotule mobile est à l'envers sous le profilé laminé HEB 340. Pour garantir le degré de liberté dans le sens horizontal, une structure composée d'un palier en élastomère, d'une plaque d'acier répartissant la charge et d'une couche de glissement en téflon se trouve entre la poutre d'essai et la rotule.

## 8.2 Préparation de l'essai

Les éprouvettes ont été soulevées dans le banc d'essai à l'aide du pont roulant. Après la dépose et l'alignement, des irrégularités importantes ont d'abord été éliminées au moyen d'une ponceuse à béton dans les zones d'appui négatif et d'application des forces. Les deux surfaces latérales ont été recouvertes d'une peinture à dispersion qui doit permettre de détecter et de saisir les fissures dans l'éprouvette pendant l'essai.

Dans la zone située entre l'introduction des forces et l'appui positif, une grille de mesure fine d'une largeur de maille de 5 cm a été appliquée sur la peinture de dispersion. Cette grille de mesure sert en même temps de grille pour les mesures de déformation ; les points de déformation sont disposés aux points d'intersection, comme on peut le voir sur la figure 15. La grille de mesure fine sert en outre à la localisation photogrammétrique lors de l'évaluation des prises de vue.

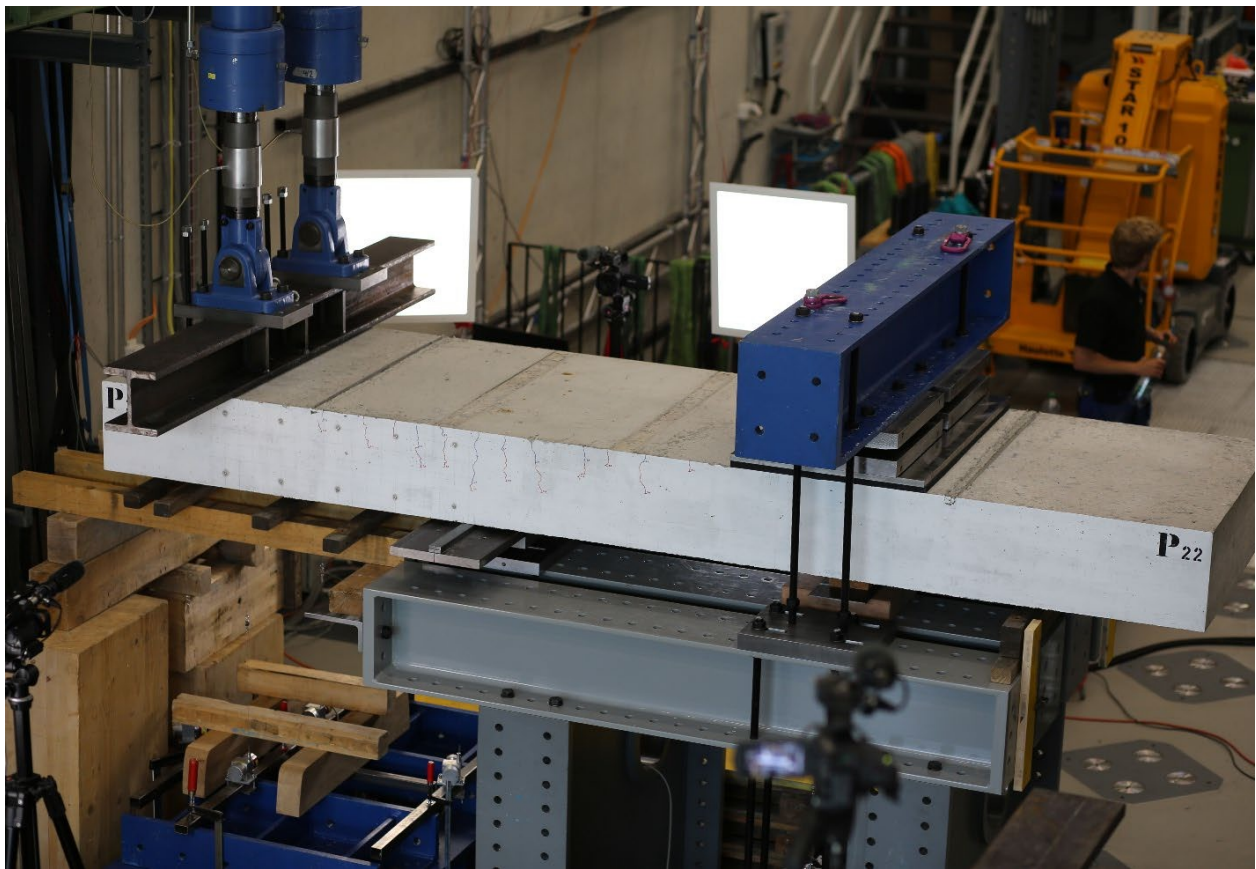


Figure 15 : Vue d'ensemble : éprouvettes dans le banc d'essai.

## 8.3 Concept de mesure

L'enregistrement continu de la déformation verticale totale le long de l'axe z est effectué à l'aide de cinq capteurs à fil tendu (CD 60) avec une plage de mesure maximale de 600 mm. Deux capteurs à fil tendu ont été placés au centre sous les deux vérins hydrauliques. Pour surveiller les déformations de l'appui négatif, un autre capteur à fil tendu a été positionné sous l'appui. De plus, des capteurs à fil tendu ont été installés à une distance de 250 mm après l'appui positif et 280 mm après la ligne d'application de la charge, voir à cet effet le schéma de la figure 16 c).



Des mesures discrètes dans le temps ont été effectuées entre les niveaux de charge à l'aide de deux déformètres. Les mesures des déformètres permettent de calculer les déformations de la surface du béton. A cet effet, dix points de déformation ont été collés des deux côtés sur la grille de mesure, ce qui donne quatre champs de mesure carrés dans la figure 16 a) et b).

#### 8.4 Programme d'essai

Le programme d'essai selon le tableau 20 est échelonné en quatre parties. On a commencé par tester les deux éprouvettes P 1.1 et P 1.2 bétonnées de part en part, qui doivent servir de valeurs de référence pour les autres essais, comme décrit au chapitre 4.1. L'analyse des enregistrements vidéo permet de déterminer les endroits d'amorçage des fissures. Ensuite, dans la deuxième partie, les trois éprouvettes ont été testées avec l'élément de coffrage mais sans renforcement de l'effort tranchant P 3.1, P 3.2 et P 4.1.

Après une courte interruption due à des absences pour cause de vacances, le programme d'essai a repris avec la troisième partie. Les deux corps d'essai restants P 2.1 et P 2.2, bétonnés de part en part, ont à nouveau été utilisés comme essais de référence pour déterminer les endroits d'initiation des fissures.

Enfin, dans la dernière partie, les trois échantillons avec élément de coffrage et renforcement intégré de l'effort tranchant P 4.2, P 5.1 et P 5.2 ont été testés.

Au cours des essais, des tests de matériaux ont été effectués en continu pour le développement de la résistance du béton.

Date de l'essai	Corps d'essai	Conception du joint de construction
01.08.2023	P 1.1	Bétonné à cœur
03.08.2023	P 1.2	Bétonné à cœur
04.08.2023	P 3.1	Sans armature d'effort tranchant
08.08.2023	P 3.2	Sans armature d'effort tranchant
14.08.2023	P 4.1	Sans armature d'effort tranchant
Interruption des vacances		
31.08.2023	P 2.1	Bétonné à cœur
04.09.2023	P 2.2	Bétonné à cœur
07.09.2023	P 4.2	Avec armature de force transversale
12.09.2023	P 5.1	Avec armature de force transversale
20.09.2023	P 5.2	Avec armature de force transversale

Tableau 20 : Programme d'expérimentation.

## 8.5 Déroulement de l'essai de charge

Afin qu'à tout moment de l'essai les deux vérins hydrauliques exercent une charge identique sur l'échantillon, ils sont réglés selon le principe "maître et esclave". En tant que maître, le vérin hydraulique n° 1 suit le déroulement de la charge programmée. En revanche, le vérin hydraulique n° 2 ne reçoit comme paramètre d'entrée que la charge actuelle du vérin hydraulique n° 1 dans l'unité [kN], avec laquelle il est piloté.

Le déroulement de l'essai P 1.1 est décrit ci-après en étapes partielles avec les explications correspondantes. Les autres essais se distinguent uniquement par le nombre d'étapes de charge.

- Étape 1 : Tracer les champs de mesure au pas de 5 cm entre l'appui et la zone d'application de la charge (des deux côtés).
- Étape 2 : Mesurer et marquer les positions et les points des champs de mesure.
- Étape 3 : Collage des points de mesure, mise en place et alignement des instruments de mesure.
- Étape 4 : Mesure du zéro 1 avec le déformètre.
- Étape 5 : Mesure du zéro 2 avec le déformètre.
- Étape 6 : Mise à zéro des capteurs de force puis dépose du système hydraulique. Étape 7 : Mise à zéro de tous les capteurs à câble.
  
- Étape 8 : Application en force de la précharge de 5 kN par vérin hydraulique, suivie du maintien des 5 kN.
  
- Étape 9 : Validation manuelle pour le premier niveau de charge.
- Étape 10 : Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 25 kN par vérin hydraulique.
- Étape 11 : Mesure de la déformation niveau de charge 1.
- Étape 12 : Détection des fissures.
  
- Étape 13 : Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 50 kN par vérin hydraulique.
- Étape 14 : Mesure de la déformation niveau de charge 2
- Étape 15 : Détection des fissures.
  
- Étape 16 : Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 75 kN par vérin hydraulique.
- Étape 17 : Mesure de la déformation niveau de charge 3
- Étape 18 : Saisie des fissures.
  
- Étape 19 : Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 100 kN par vérin hydraulique.
- Étape 20 : Mesure de la déformation niveau de charge 4.
- Étape 21 : Détection des fissures.
  
- Étape 22 : Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 125 kN par vérin hydraulique.
- Étape 23 : Mesure de la déformation niveau de charge 5.
- Étape 24 : Saisie des fissures.



- Étape 25 :      Chargement en fonction de la course de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à 150 kN par vérin hydraulique.
- Étape 26 :      Mesure de la déformation niveau de charge 6.
- Étape 27 :      Détection des fissures.
- 
- Étape 28 :      Chargement en fonction de la course de l'élément de frappe à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte.
- Étape 29 :      Fin de l'essai après rupture de l'éprouvette.
- 
- Étape 30 :      Enregistrer les données de l'expérience.
- Étape 31 :      Démontage de l'éprouvette.

## 9 Résultats des essais

Les essais ont été réalisés conformément au programme d'essai du chapitre 8.4 et aux niveaux de charge ainsi définis. Les grandeurs de force et de déplacement enregistrées pendant les essais avec les capteurs à fil tendu sont représentées graphiquement par un diagramme. Les mesures des déflecteurs ont été évaluées ponctuellement en vue d'une analyse approfondie. Une évaluation complète de tous les niveaux de charge et de tous les points de mesure n'a pas été effectuée ; cela peut être repris pour des études scientifiques approfondies. La structure des chapitres suivants correspond au déroulement chronologique du programme d'essai.

### 9.1 Eprouvette P 1.1

L'éprouvette P 1.1 a marqué le début des dix essais au total et a été la première des quatre essais avec bétonnage. Elle sert de référence pour les éprouvettes avec les éléments de coffrage installés. La figure 17 montre schématiquement l'éprouvette P 1.1 avec sa disposition dans le banc d'essai et l'indication des principales dimensions.

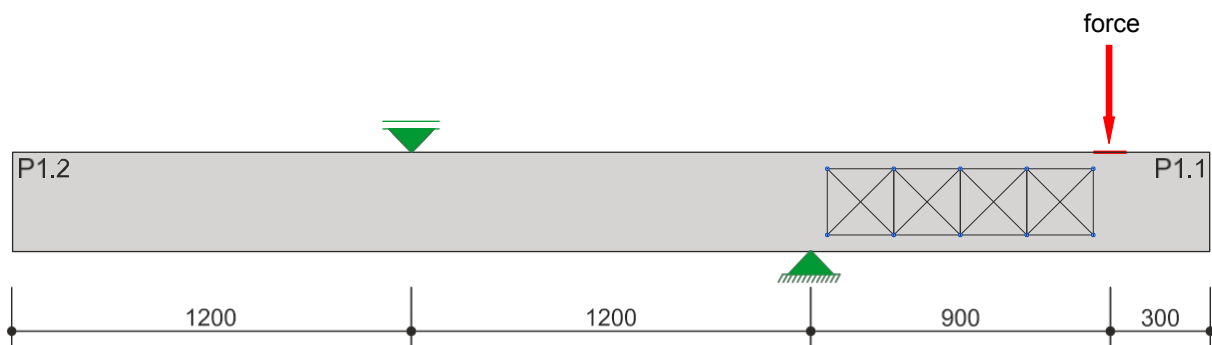


Figure 17 : Positionnement de l'éprouvette P 1.1 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 - LS 5 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion se sont formées à une distance d'environ 30 cm de l'application des forces.
- LS 6 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer de manière oblique en direction de l'appui.
- LS 7 : Apparition d'une fissure transversale suivie d'une défaillance soudaine du de l'élément de frappe. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une charge maximale de 320 kN. La figure 19 montre l'élément de frappe après avoir atteint la charge de rupture.

force [kN]

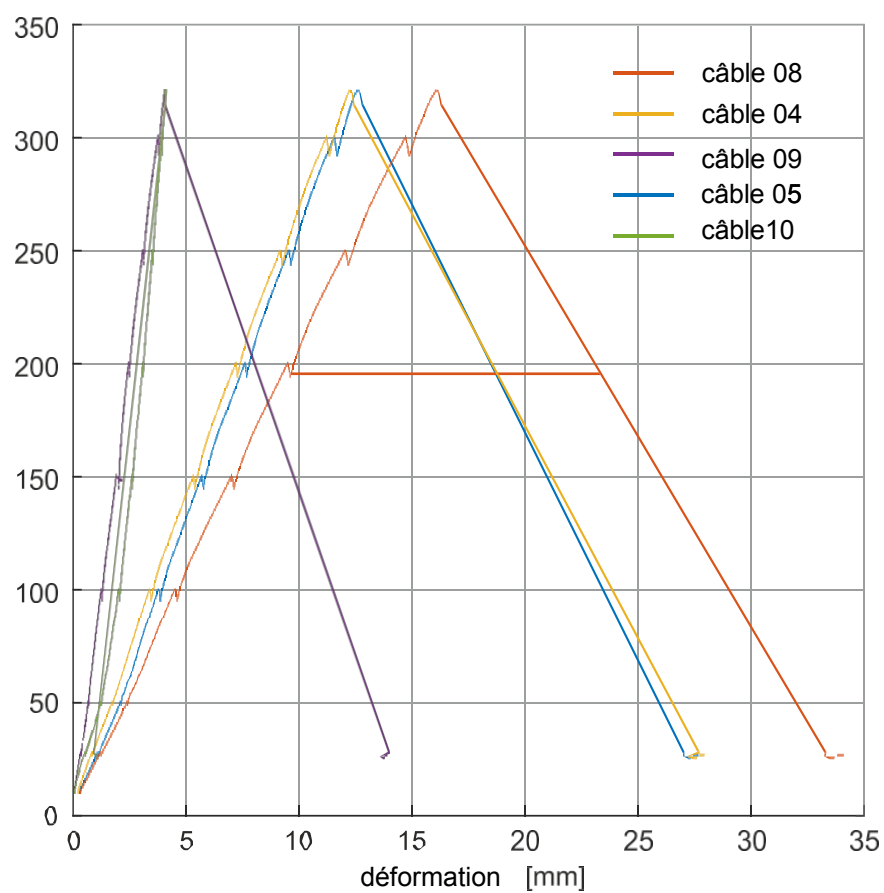


Figure 18 : Éprouvette P1.1 : Diagramme force/déformation

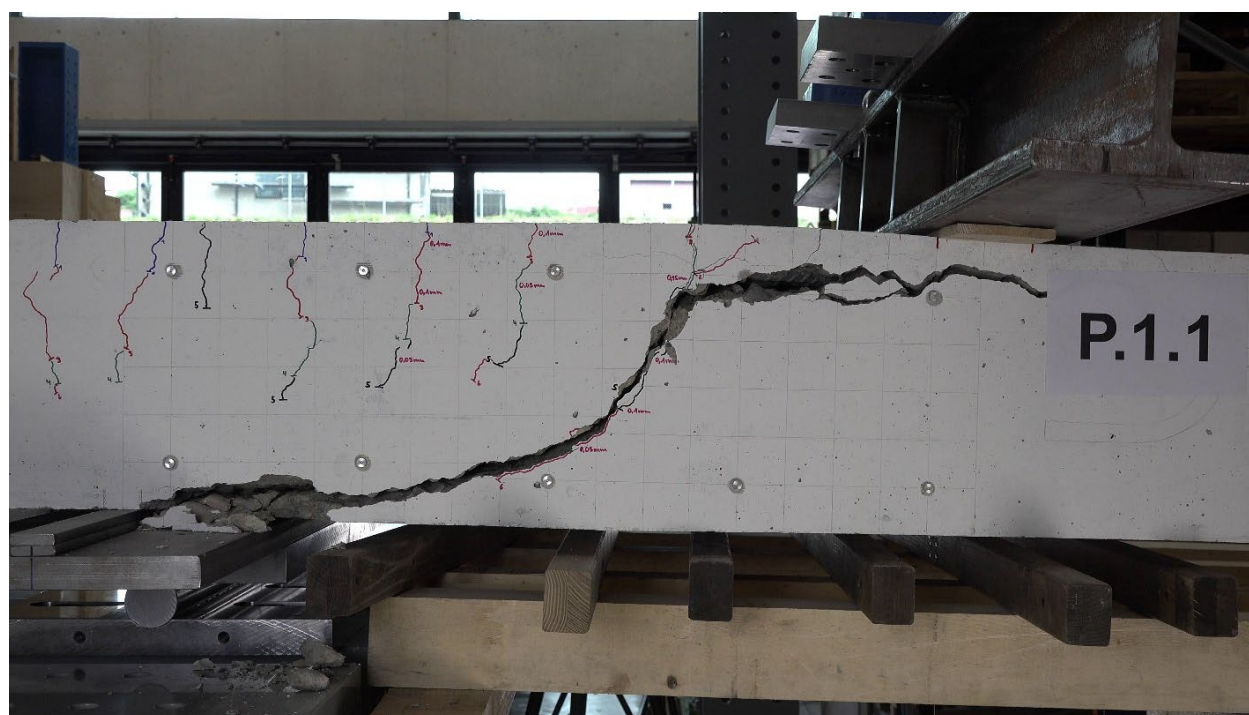


Figure 19 : Epreuve P 1.1 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

## 9.2 Eprouvette P 1.2

L'échantillon P 1.2 était le deuxième des dix essais. Il sert également de valeur de référence pour les essais suivants.

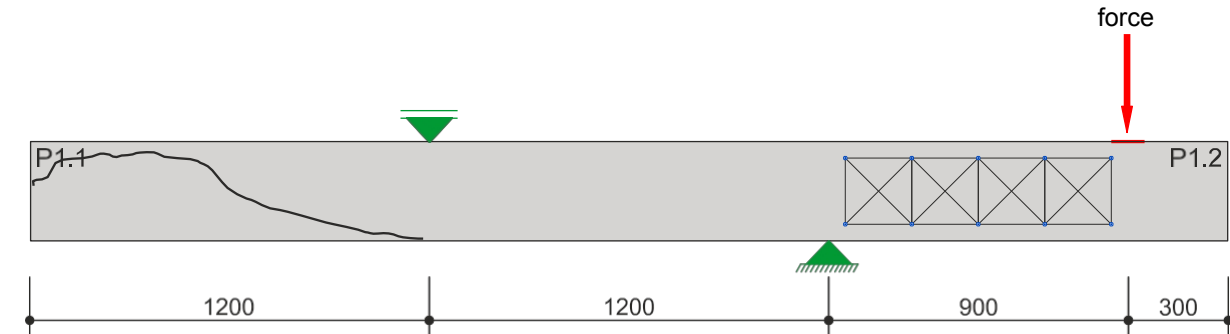


Figure 20 : Positionnement de l'éprouvette P 1.2 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'a été observée lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 - LS 5 : Les fissures de flexion existantes s'agrandissent continuellement de manière oblique en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 30 cm de l'introduction des forces.
- LS 6 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer de manière oblique en direction de l'appui.
- LS 7 : Apparition d'une fissure d'effort tranchant suivie d'une rupture brutale de l'élément de frappe. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une charge maximale de 342 kN.

force [kN]

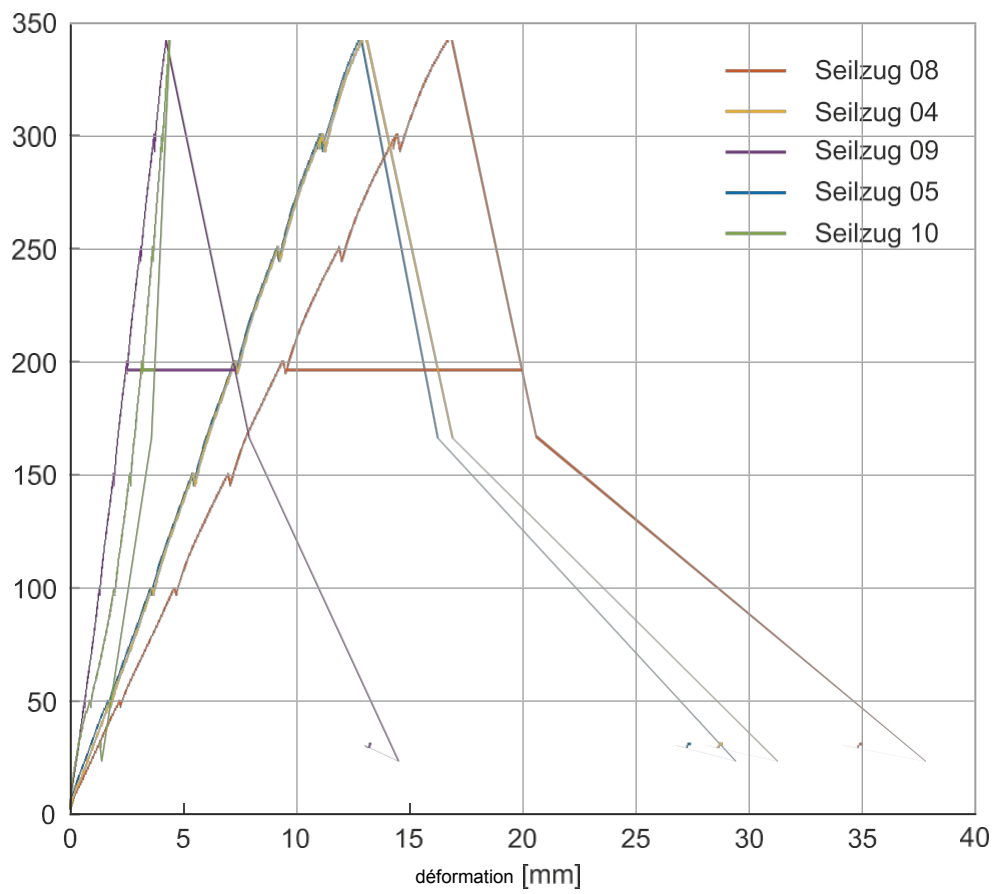


Figure 21 : Éprouvette P1.2 : diagramme force-déformation.

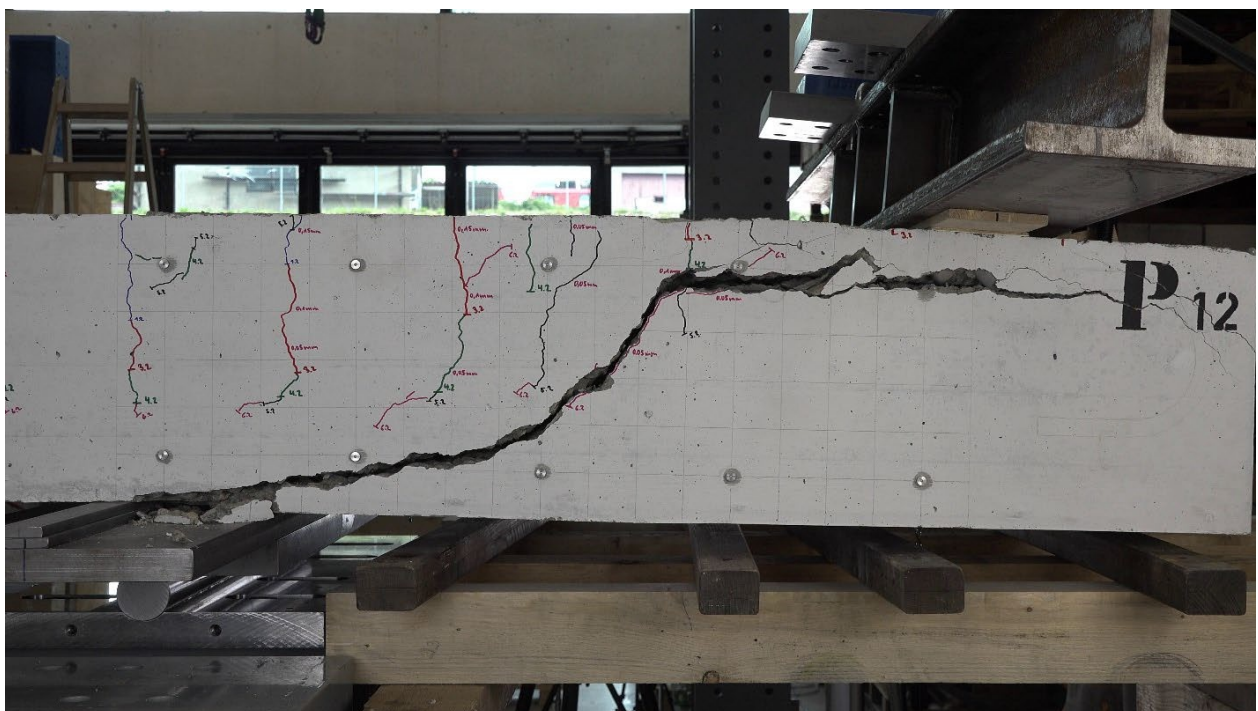


Figure 22 : Éprouvette P 1.2 : fissure d'effort tranchant après la fin de l'essai.

### 9.3 Epreuve P 3.1

L'éprouvette P 3.1 était le troisième essai sur un total de dix et le premier pour lequel un élément de coffrage sans renforcement de la force transversale a été utilisé. L'évaluation des essais de référence a montré que la position de l'amorce de fissure se situait à une distance de 35 à 40 cm de l'application de la force. Le positionnement de l'élément de coffrage pour le premier essai a donc été fixé à une distance de 35 cm de l'introduction de la force. Il convient de noter que l'élément de frappe est étiqueté à tort P 2.1 au lieu de P 3.1. Il convient d'en tenir compte, en particulier pour les photographies.

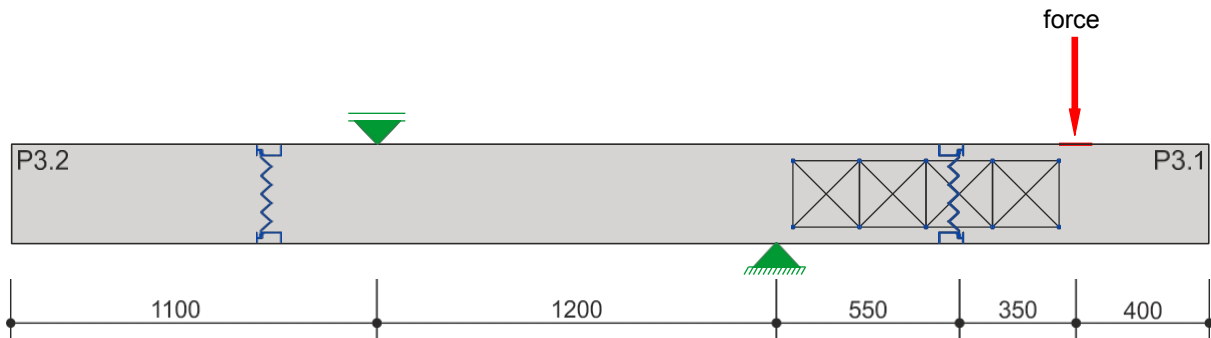


Figure 23 : Positionnement de l'éprouvette P 3.1 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 40 cm de l'introduction des forces.
- LS 4-5 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, une nouvelle fissure se forme, qui commence à environ 30 cm de l'application des forces et traverse l'élément de coffrage le long d'une came.
- LS 6 : Apparition d'une fissure de cisaillement suivie d'une défaillance de l'élément de frappe. La rupture de l'élément de frappe est nettement moins brutale que celle des éléments de frappe bétonnés. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une valeur charge maximale de 289 kN.



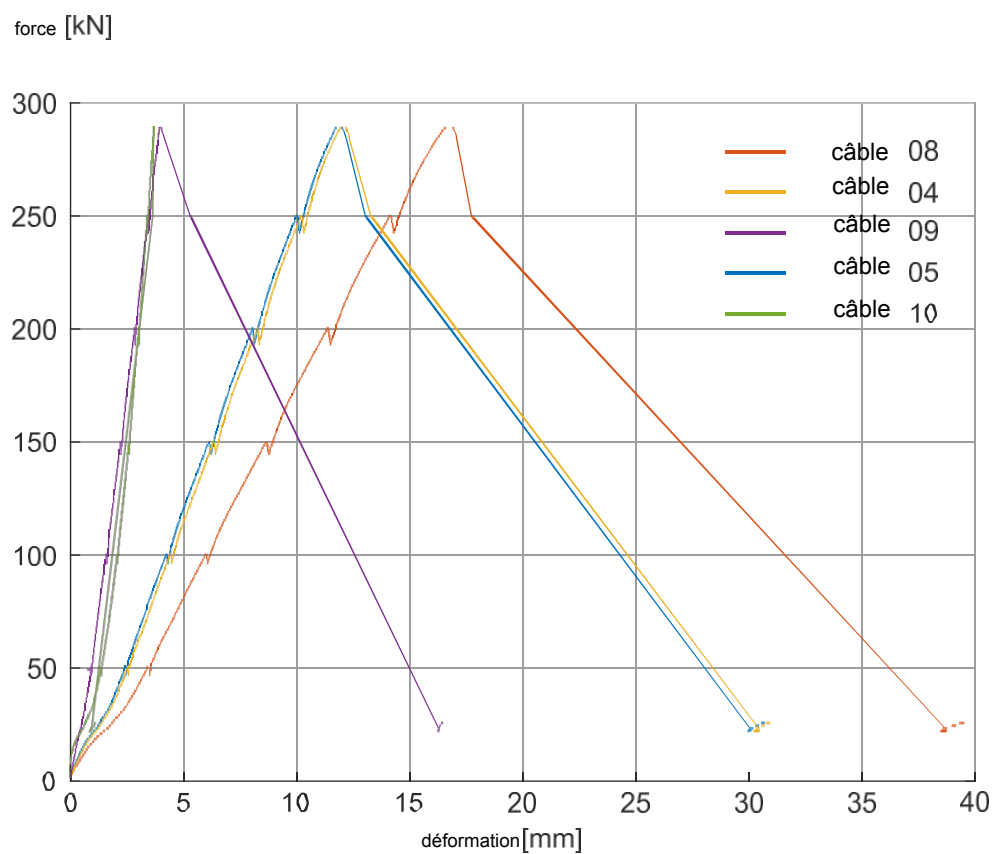


Figure 24 : Éprouvette P3.1 : diagramme force-déformation.

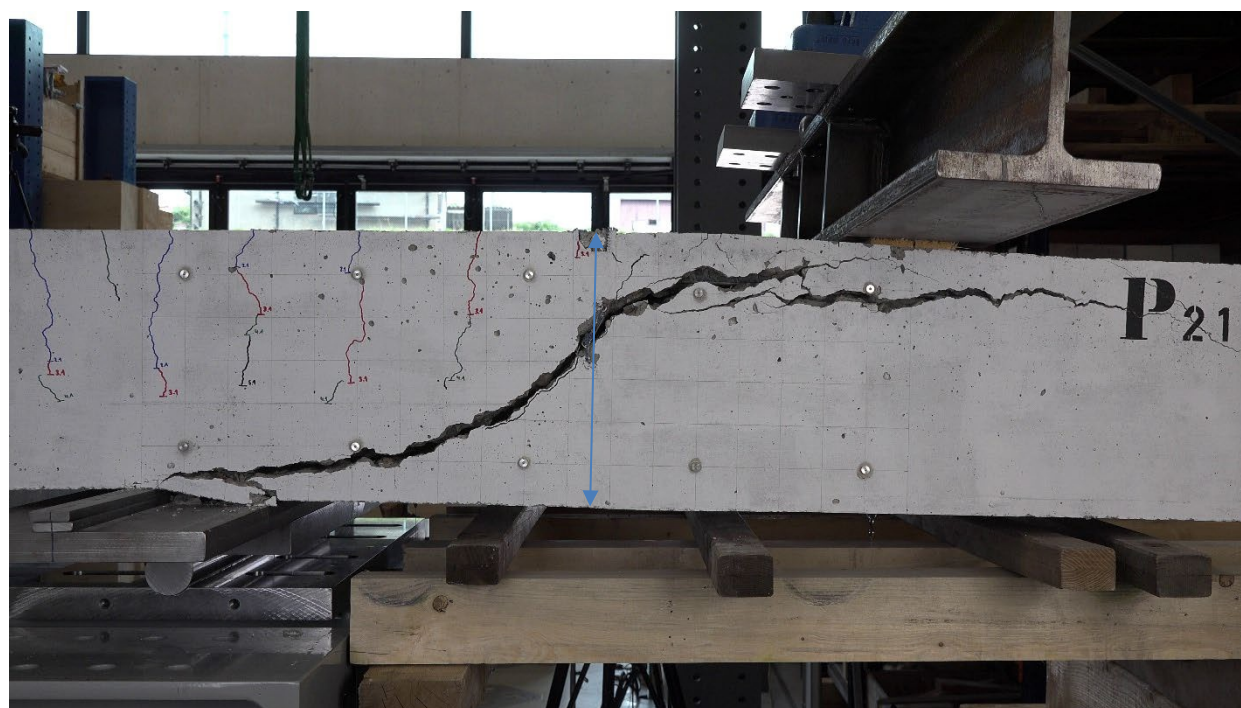


Figure 25 : Éprouvette P 3.1 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

#### 9.4 Epreuve P 3.2

L'élément de frappe P 3.2 était le quatrième des dix essais et le deuxième à utiliser un élément de coffrage sans renforcement de l'effort tranchant. L'élément de coffrage a été positionné à 40 cm de l'application de la force. Cette position a été déterminée après évaluation des essais P 1.1 et P 1.2. Il est à noter que le corps d'épreuve est étiqueté à tort P 2.2 au lieu de P 3.2. Il convient d'en tenir compte, en particulier pour les photographies.

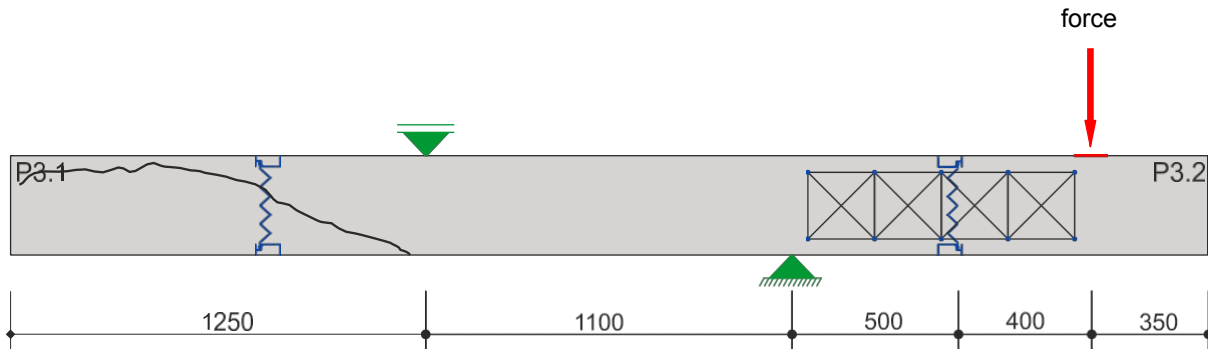


Figure 26 : Positionnement de l'éprouvette P 3.2 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 30 cm de l'introduction des forces.
- LS 4-5 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, une fissure se forme le long de la came dans l'élément de coffrage.
- LS 6 : Apparition d'une fissure de cisaillement suivie d'une défaillance de l'élément de frappe. La rupture de l'élément de frappe est nettement moins brutale que celle des éléments de frappe bétonnés. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une valeur charge maximale de 291 kN.



Kraft[kN]

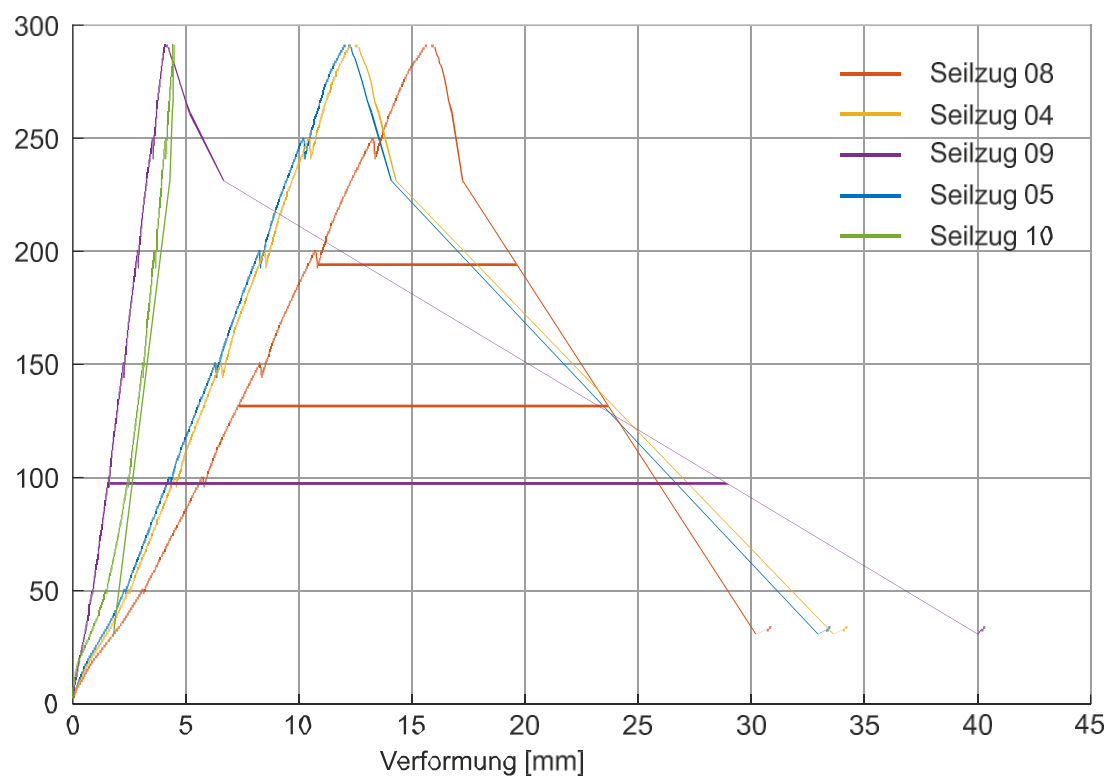


Figure 27 : Éprouvette P3.2 : diagramme force-déformation.

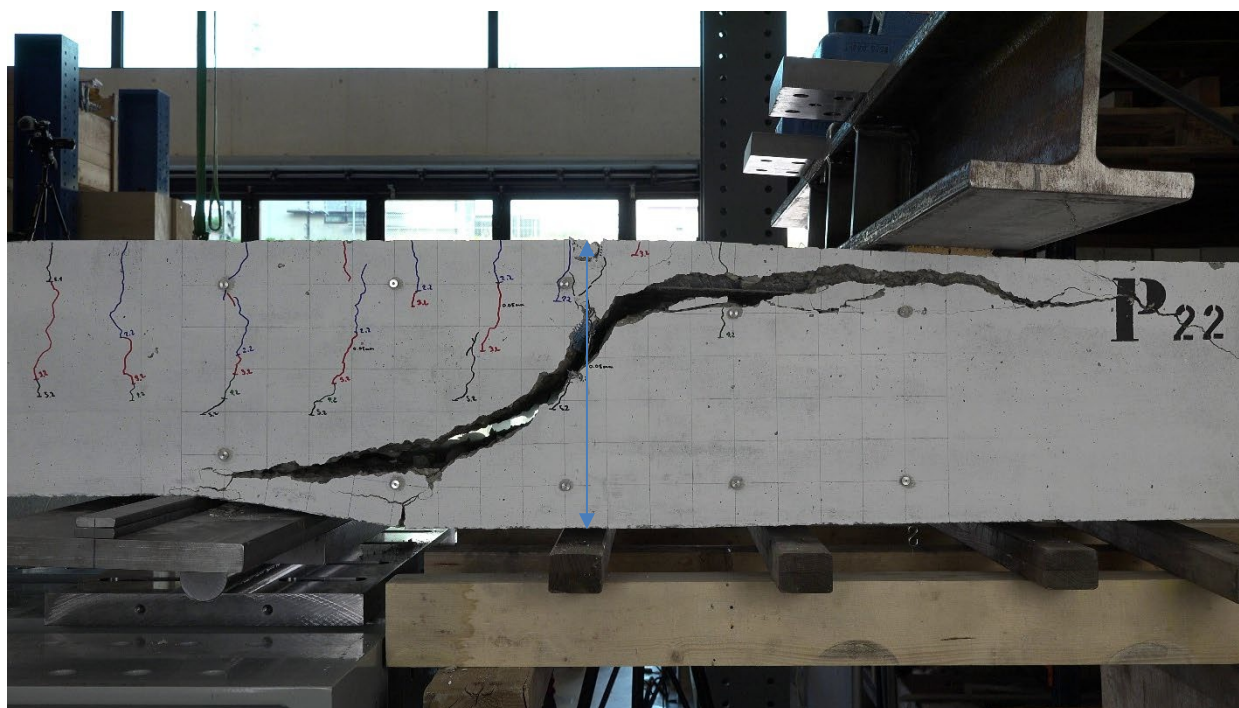


Figure 28 : Éprouvette P 3.2 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

## 9.5 Epreuve P 4.1

L'élément de frappe P 4.1 était le cinquième des dix essais et le troisième pour lequel un élément de coffrage sans renforcement de l'effort tranchant a été utilisé. L'élément de coffrage a été positionné à 37,5 cm de l'application de la force. Cette position a été définie après l'évaluation des essais P 1.1 et P 1.2.

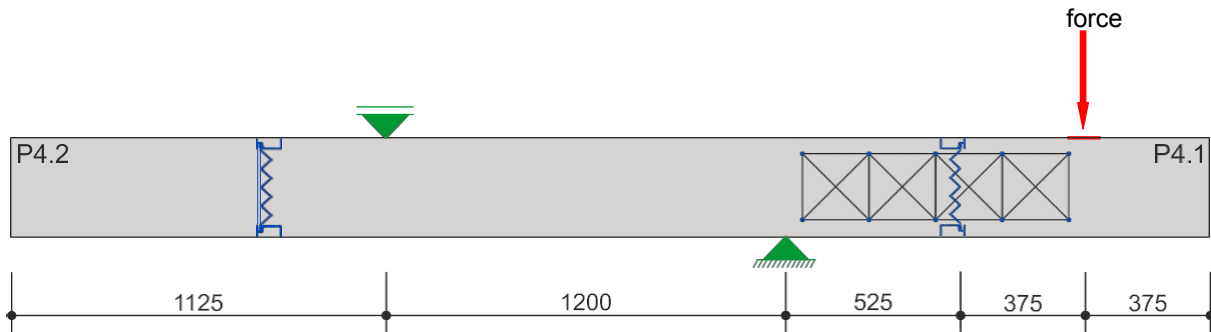


Figure 29 : Positionnement de l'éprouvette P 4.1 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3-4 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 40 cm de l'introduction des forces.
- LS 5 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, une fissure se forme en travers de l'élément de coffrage le long d'un angle.
- LS 6 : Apparition d'une fissure de cisaillement suivie d'une défaillance de l'élément de frappe. La rupture de l'élément de frappe est nettement moins brutale que celle des éléments de frappe bétonnés. Juste avant la rupture, l'élément de frappe atteint une charge maximale de 278 kN.

force[kN]

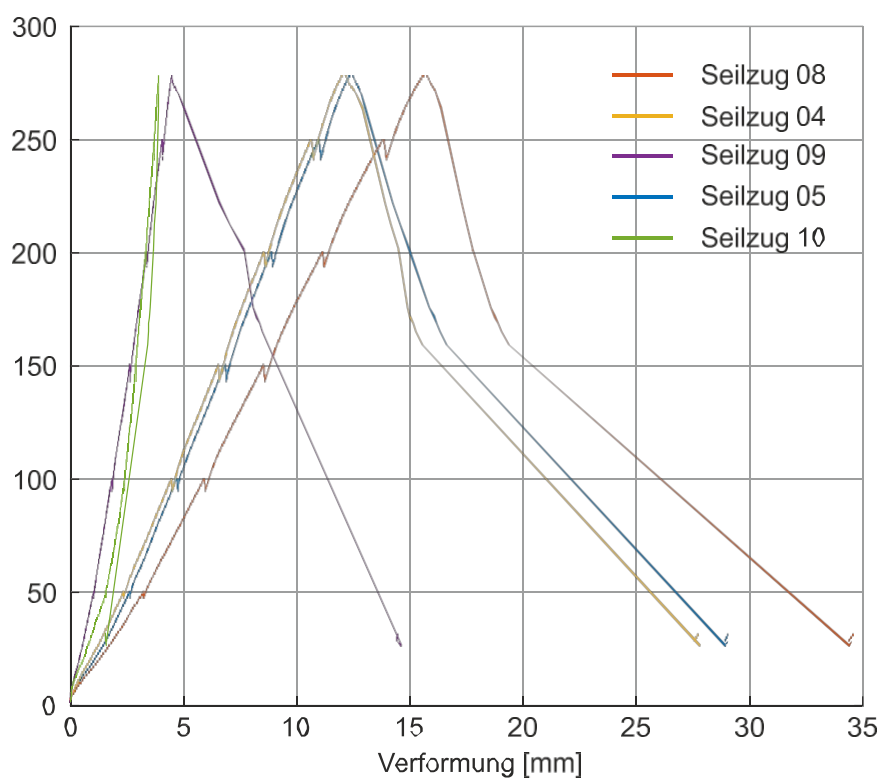


Figure 30 : Éprouvette P4.1 : diagramme force-déformation.

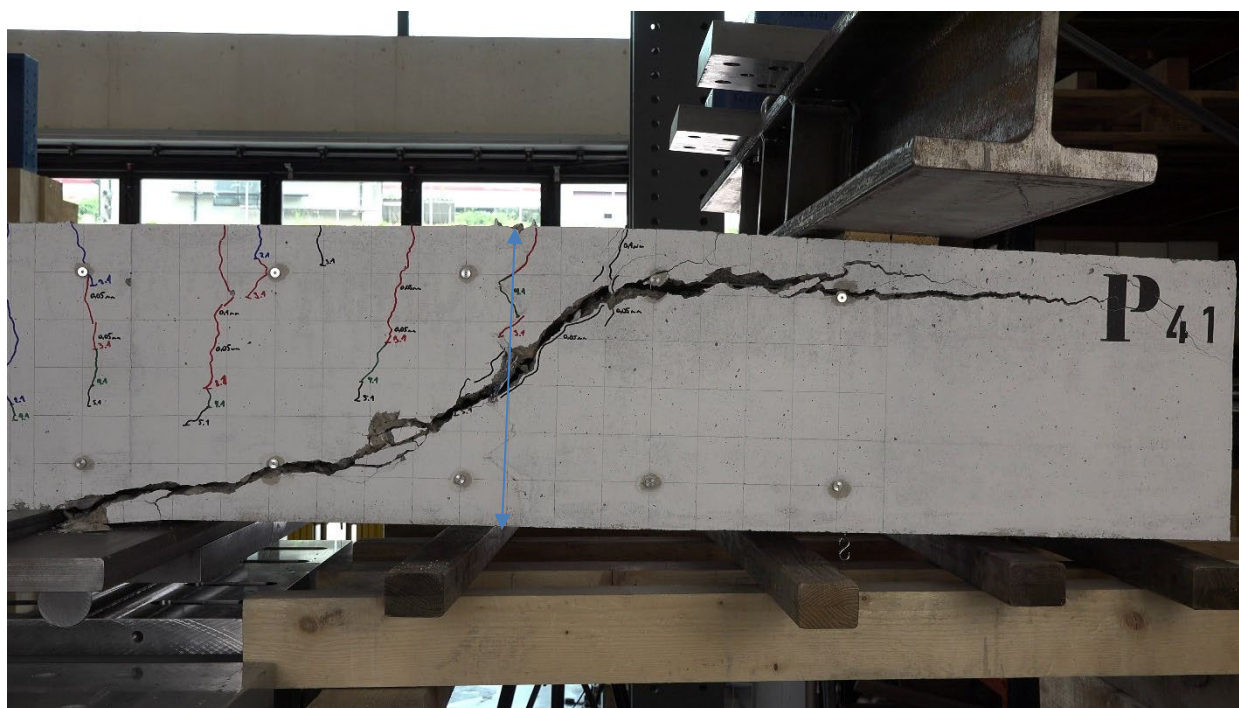


Figure 31 : Epreuve P 4.1 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

## 9.6 Eprouvette P 2.1

L'éprouvette P 2.1 était la sixième sur un total de dix essais et était la troisième des quatre éprouvettes bétonnées. Il convient en outre de noter que l'éprouvette a été étiquetée à tort P 1.3 au lieu de P 2.1.

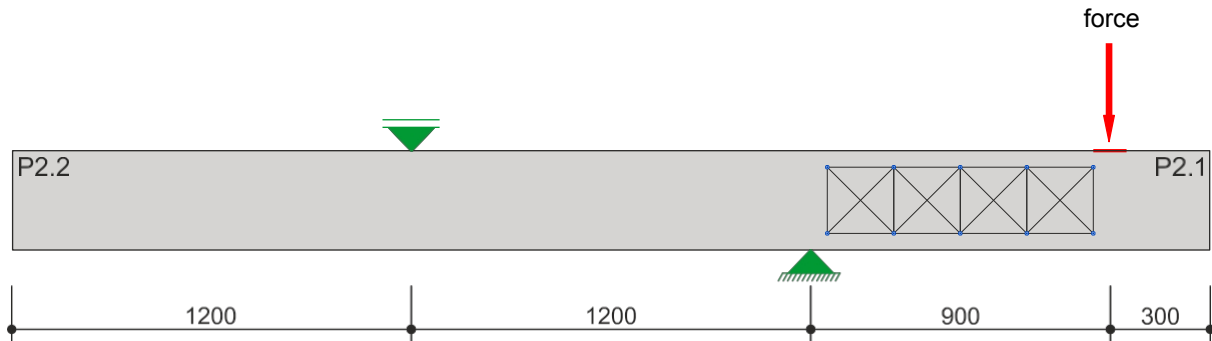


Figure 32 : Positionnement de l'éprouvette P 2.1 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

Il faut noter que l'appui négatif n'a pas reposé proprement sur la surface de l'éprouvette en raison d'irrégularités, ce qui a peut-être eu une influence sur le résultat de l'essai.

a)



b)

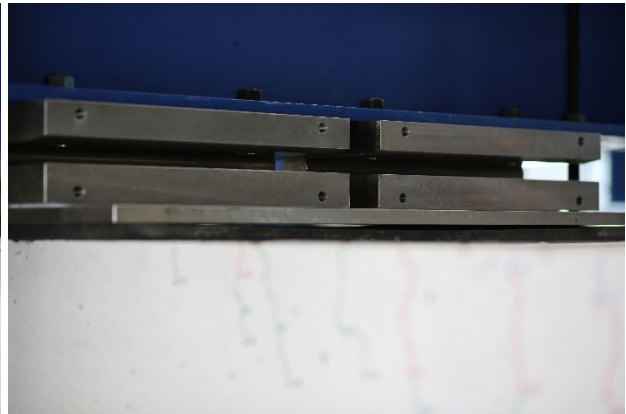


Figure 33 : Epreuve P 2.1 : irrégularités dans la zone de l'appui négatif.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'a été observée lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 - LS 5 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 25 cm de l'introduction des forces.
- LS 5 : Apparition d'une fissure d'effort tranchant suivie d'une rupture brutale de l'élément de frappe. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une valeur maximale de 279 kN.

Kraft[kN]

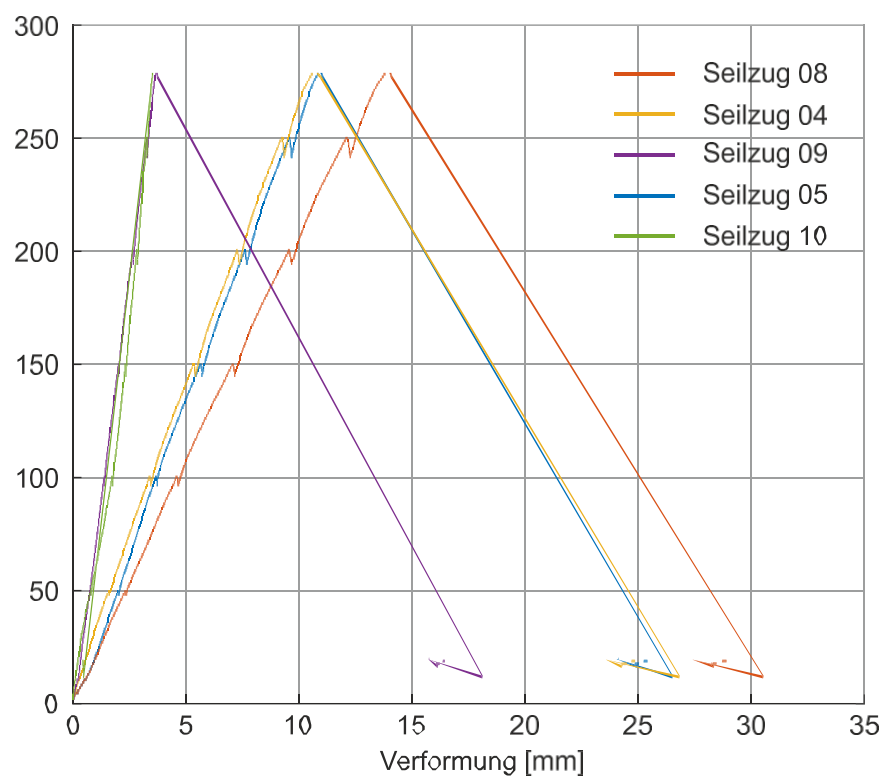


Figure 34 : Échantillon P2.1 : diagramme force-déformation.

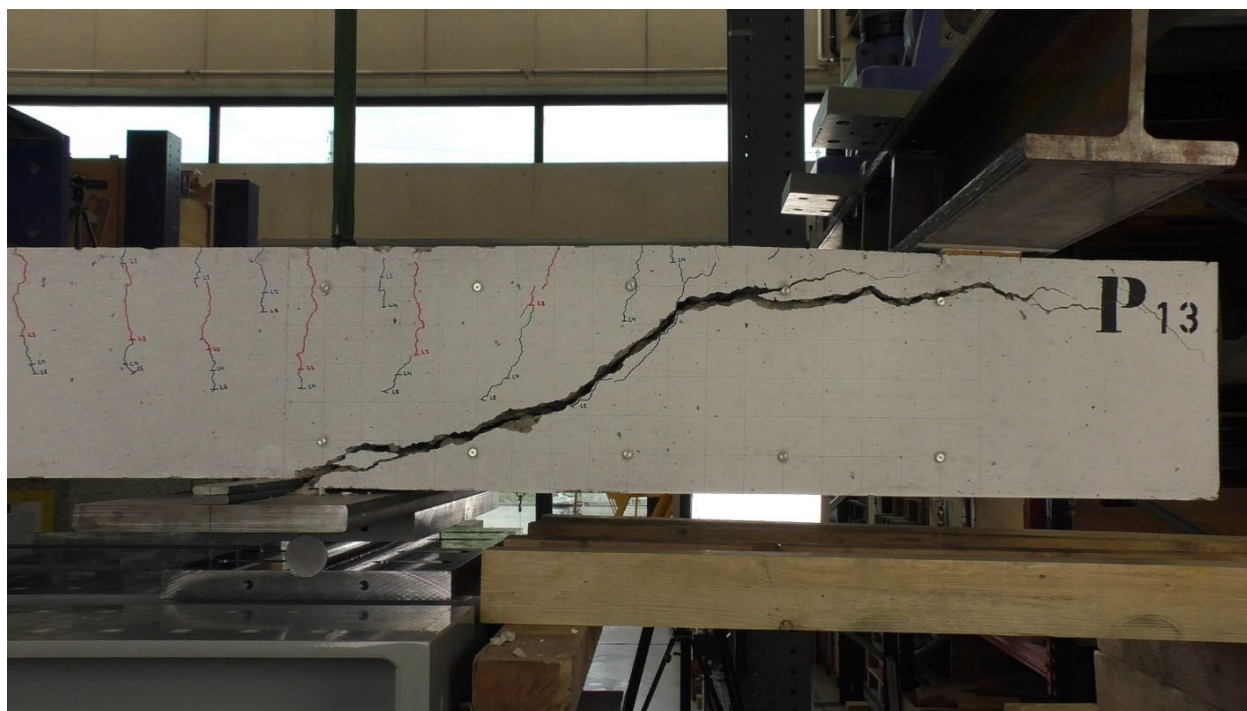


Figure 35 : Epreuve P 2.1 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

## 9.7 Eprouvette P 2.2

L'éprouvette P 2.2 était la septième des dix essais au total et la quatrième des quatre éprouvettes bétonnées. Il convient de noter que l'éprouvette a été étiquetée à tort P 1.4 au lieu de P 2.2.

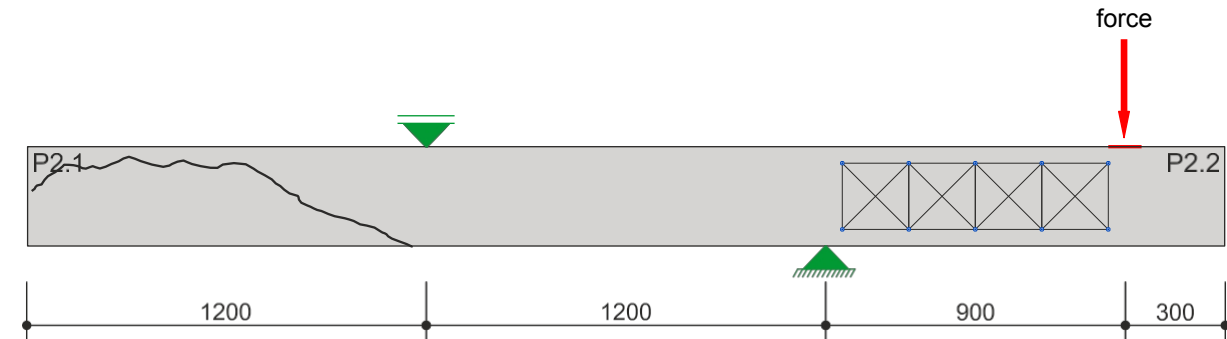


Figure 36 : Positionnement de l'éprouvette P 2.2 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 3 - LS 6 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 30 cm de l'introduction des forces.
- LS 7 : Apparition d'une fissure d'effort tranchant suivie d'une rupture brutale de l'élément de frappe. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une valeur maximale de 329 kN.



Kraft[kN]

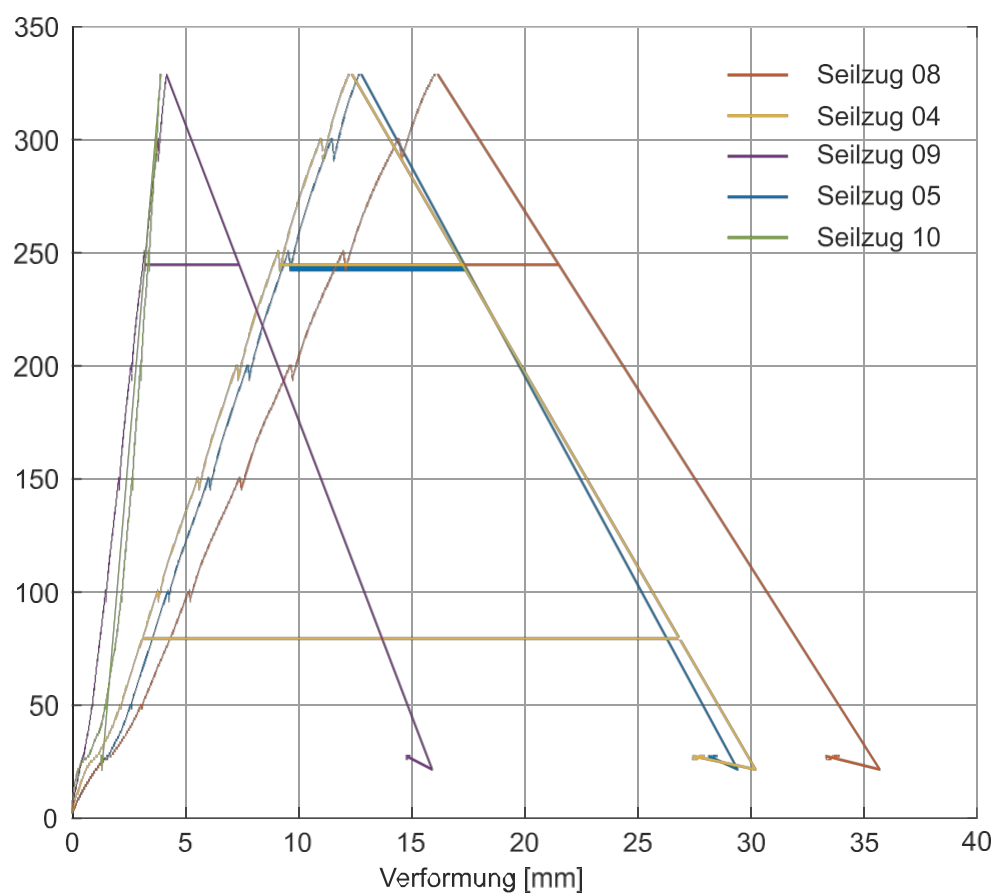


Figure 37 : Échantillon P2.2 : diagramme force-déformation.



Figure 38 : Epruvette P 2.2 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai

## 9.8 Epreuve P 4.2

L'élément de frappe P 4.2 était le huitième des dix essais et le premier à utiliser un élément de coffrage avec renforcement de l'effort tranchant. L'élément de coffrage a été placé à 35 cm de l'application de la force.

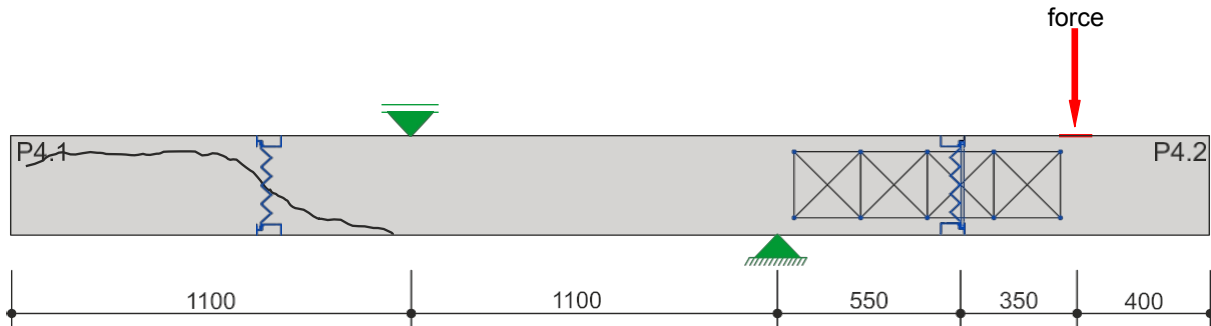


Figure 39 : Positionnement de l'éprouvette P 4.2 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 2 - LS 7 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De plus, de nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 15 cm de l'introduction des forces.
- LS 8 : Apparition d'une fissure de cisaillement qui s'étend transversalement depuis l'application des forces jusqu'à l'appui positif. D'autres fissures plus petites se forment également. La fissure de cisaillement s'ouvre à travers l'élément de coffrage, voir la première marque rouge sur la figure 40.
- LS 9 : Les fissures plus petites de LS 8 continuent de se développer. Une nouvelle fissure se forme directement au niveau de l'élément de coffrage, en direction de l'appui positif. Une deuxième fissure de cisaillement s'ouvre à l'extérieur de l'élément de coffrage, voir le deuxième marquage rouge sur la figure 40.
- LS 10 : La fissure de LS 9 continue de se propager en direction de l'appui jusqu'à ce qu'il y ait défaillance de l'éprouvette. Juste avant la rupture, l'éprouvette a atteint une charge maximale de 469 kN.



Kraft[kN]

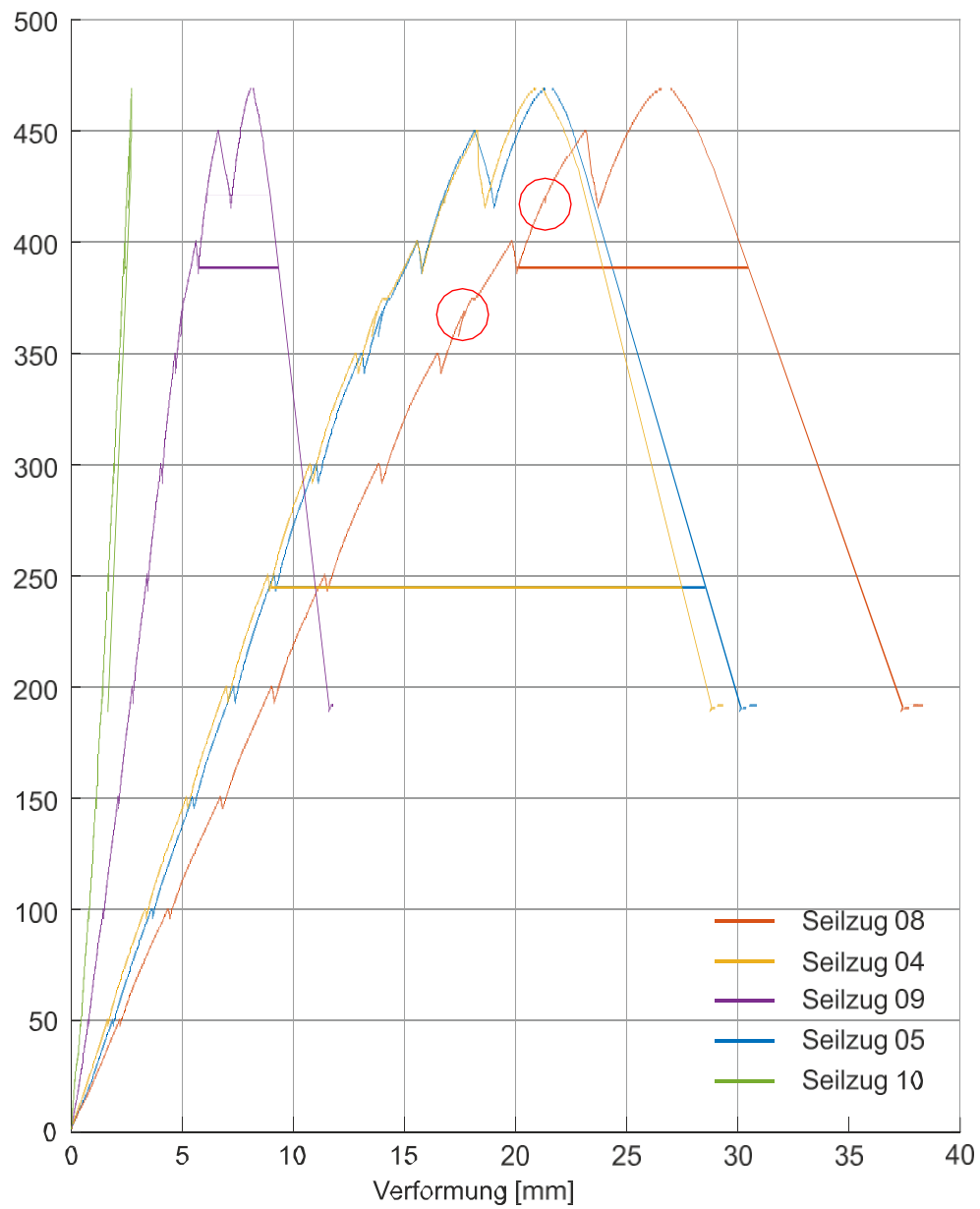


Figure 40 : Éprouvette P4.2 : diagramme force-déformation.

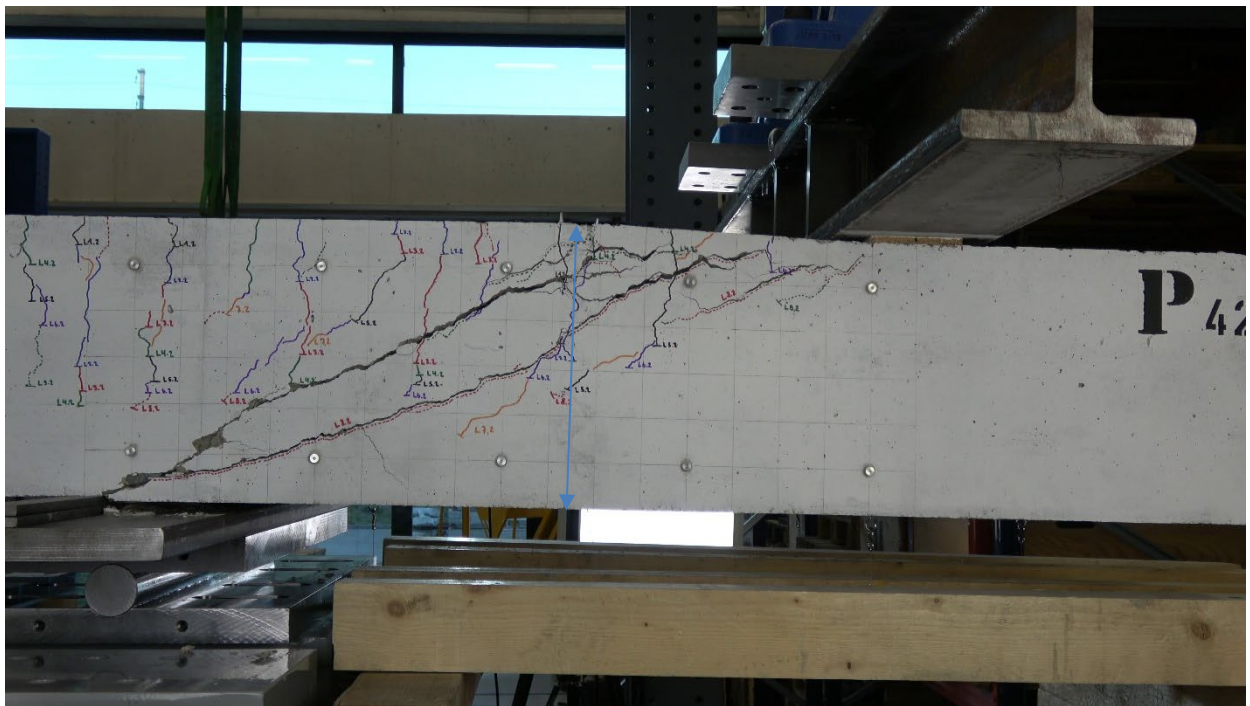


Figure 41 : Eprouvette P 4.2 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

## 9.9 Epreuve P 5.1

L'élément de frappe P 5.1 était le neuvième des dix essais et le deuxième à un élément de coffrage avec renforcement de l'effort tranchant. L'élément de coffrage a été placé à 40 cm de l'application de la force.

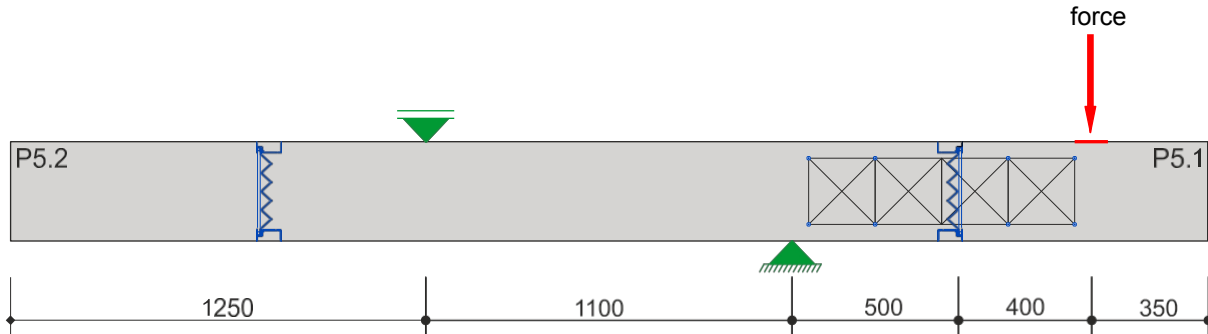


Figure 42 : Positionnement de l'éprouvette P 5.1 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 2 - LS 6 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De nouvelles fissures de flexion sont apparues jusqu'à environ 35 cm de l'introduction des forces. Une fissure s'est formée dans le LS 4 et a traversé l'élément de coffrage. La fissure de cisaillement s'ouvre à l'extérieur de l'élément de coffrage, voir la première marque rouge sur la figure 43 et la figure 40.
- LS 7 : Directement au niveau de l'élément de coffrage, il se produit une fissure de cisaillement qui s'étend transversalement en direction de l'appui positif.
- LS 8 : La fissure de LS 7 continue à s'ouvrir jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une charge maximale de 374 kN.

Kraft[kN]

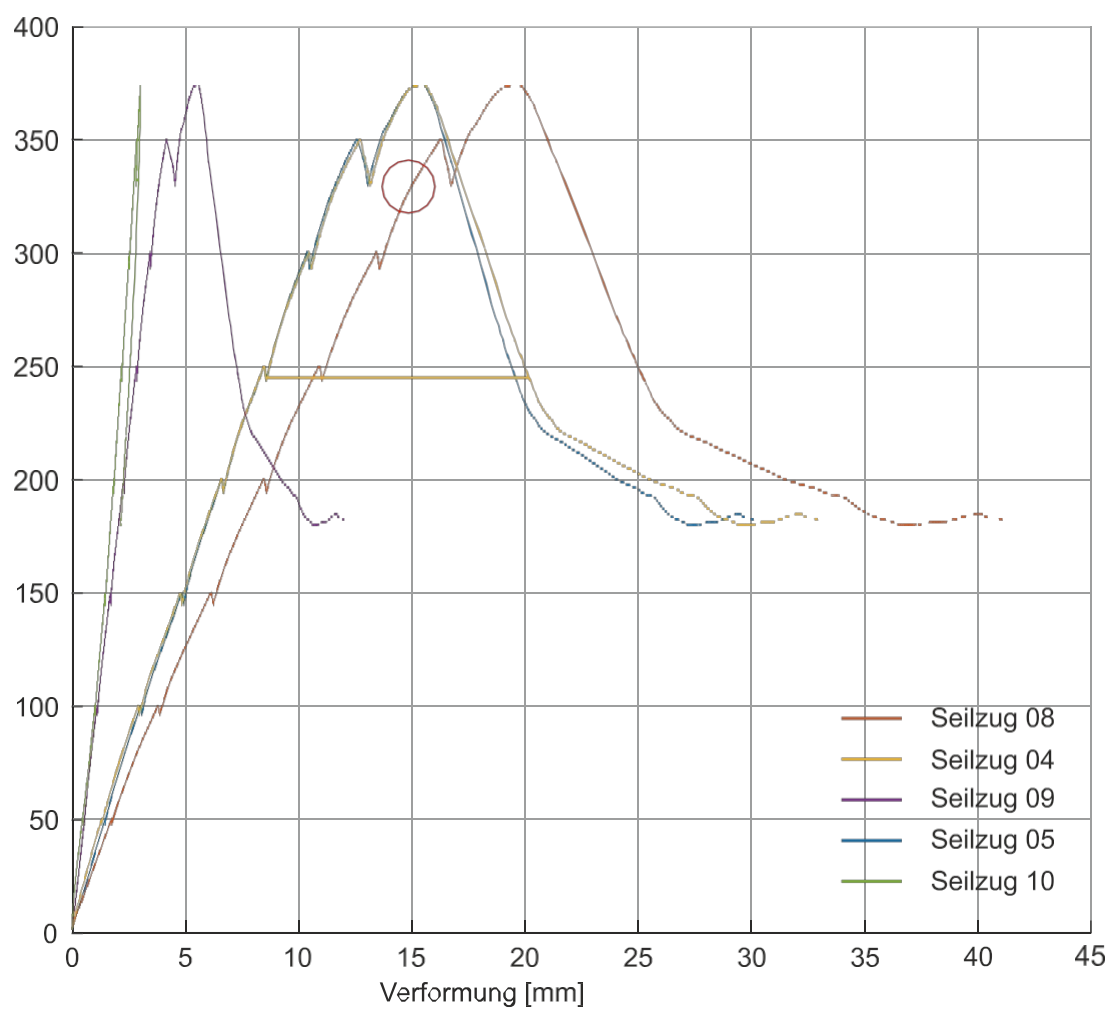


Figure 43 : Éprouvette P5.1 : diagramme force-déformation.

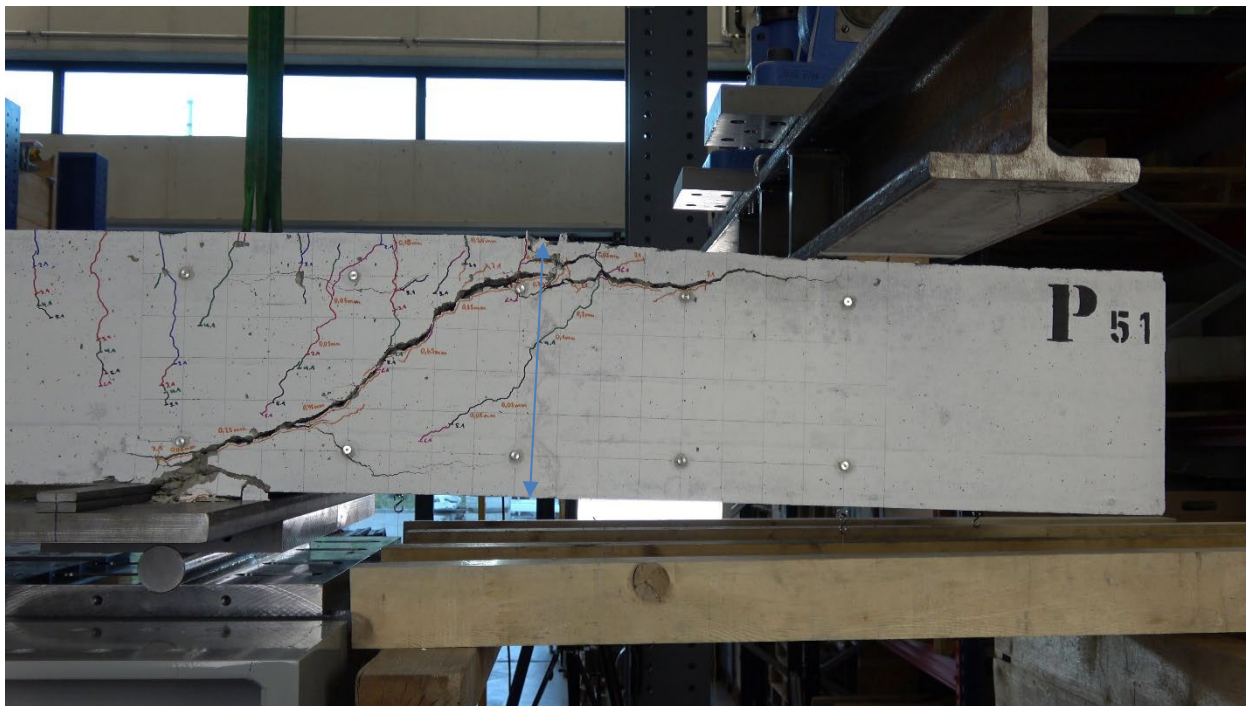


Figure 44 : Epreuve P 5.1 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.

### 9.10 Epreuve P 5.2

L'élément de frappe P 5.1 était le dixième des dix essais et le troisième à utiliser un élément de coffrage avec renforcement de l'effort tranchant. L'élément de coffrage a été positionné à 37,5 cm de l'application de la force.

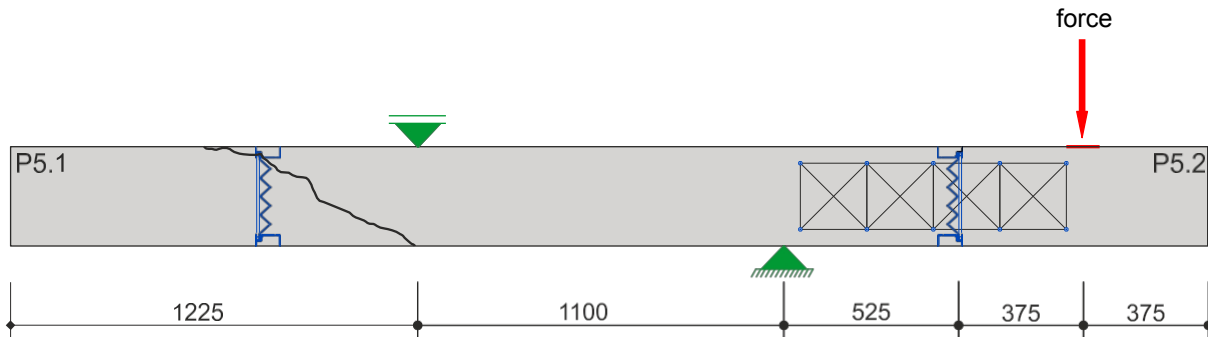


Figure 45 : Positionnement de l'éprouvette P 5.2 dans le banc d'essai avant l'essai.

Au cours de l'expérience, les observations suivantes ont pu être faites :

- LS 1 : Aucune fissure n'était lorsque le niveau de charge 1 a été atteint.
- LS 2 : Premières fissures de flexion visibles dans la zone de l'appui positif.
- LS 2 - LS 6 : Les fissures de flexion existantes ont continué à se développer en biais en direction de l'appui. De nouvelles fissures de flexion apparues jusqu'à environ 20 cm de l'introduction des forces. Dans le LS 6, une fissure s'est formée en travers de l'élément de coffrage.
- LS 7 : Une fissure de cisaillement se forme directement au niveau de l'élément de coffrage et s'étend transversalement en direction de l'appui positif. La fissure de cisaillement continue à s'ouvrir pendant que la charge est maintenue. La fissure de cisaillement s'ouvre légèrement, voir la première marque rouge sur l'image.  
46. après avoir atteint le niveau de charge : la déchirure de poussée continue à s'ouvrir pendant que la charge est maintenue, voir le deuxième marquage rouge sur la figure 46.
- LS 8 : La fissure de LS 7 s'un peu plus. D'autres petites fissures apparaissent.
- LS 9 : La fissure de LS 7 continue de s'ouvrir jusqu'à la rupture de l'élément de frappe. Juste avant la rupture, l'élément de frappe a atteint une charge maximale de 430 kN.

Kraft[kN]

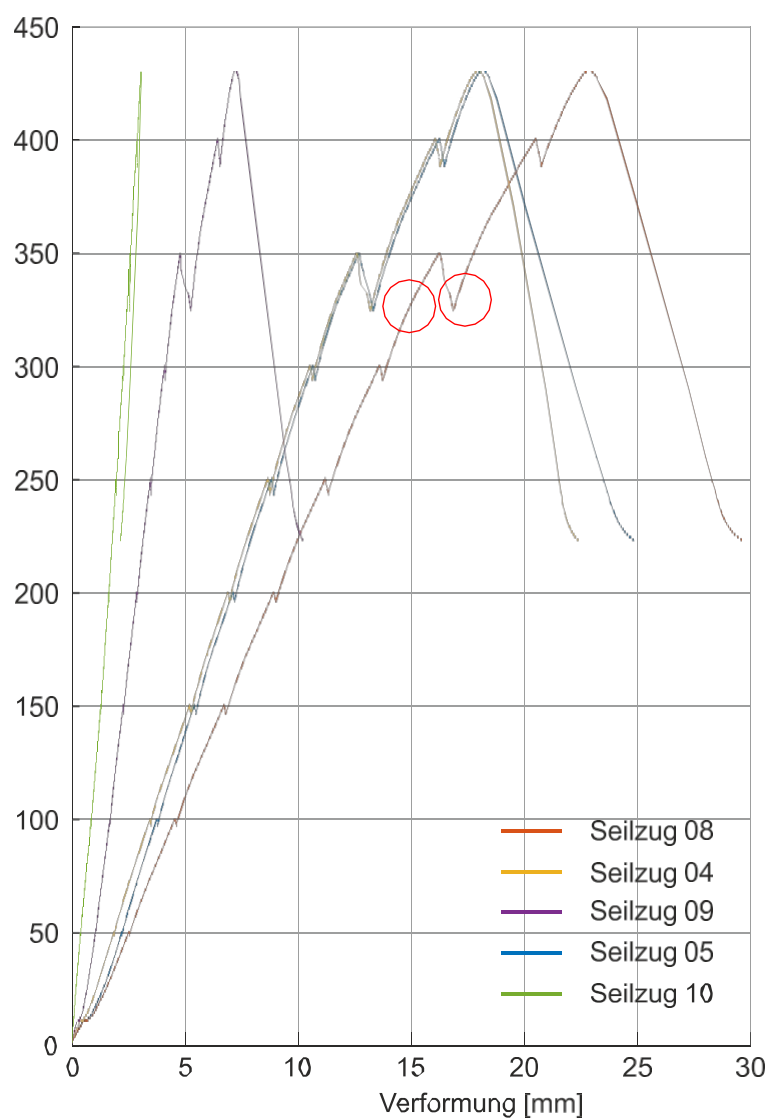


Figure 46 : Éprouvette P5.2 : diagramme force-déformation.

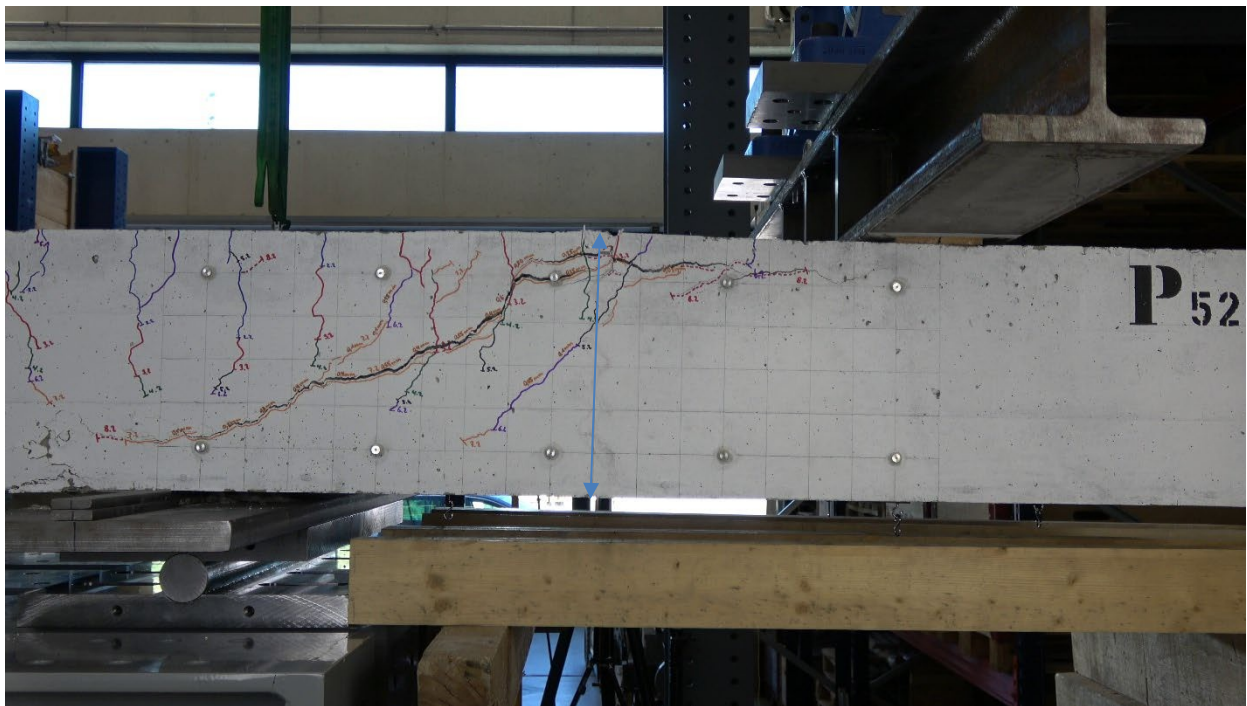


Figure 47 : Epreuve P 5.2 : fissure par effort tranchant après la fin de l'essai.



## 10 Résumé

### 10.1 Comparaison des charges de rupture

La figure 48 montre le résumé des charges de rupture de toutes les éprouvettes dans l'ordre chronologique. En rouge, les résultats des éprouvettes bétonnées de part en part sont représentés comme valeurs de référence. La valeur moyenne de 330 kN déterminée par calcul à partir des essais P 1.1, P 1.2 et P 2.2 montre une très bonne concordance avec la valeur moyenne de 328 kN de la plage d'entretien prévue de 316 - 340 kN. Le résultat de l'éprouvette P 2.1 n'a pas été pris en compte dans le calcul de la valeur moyenne. La raison en est l'appui défavorable constaté pendant l'essai dans la zone de l'appui négatif, ce qui a fait que la charge maximale de P 2.1 est nettement plus faible (mot-clé : contraintes résiduelles).

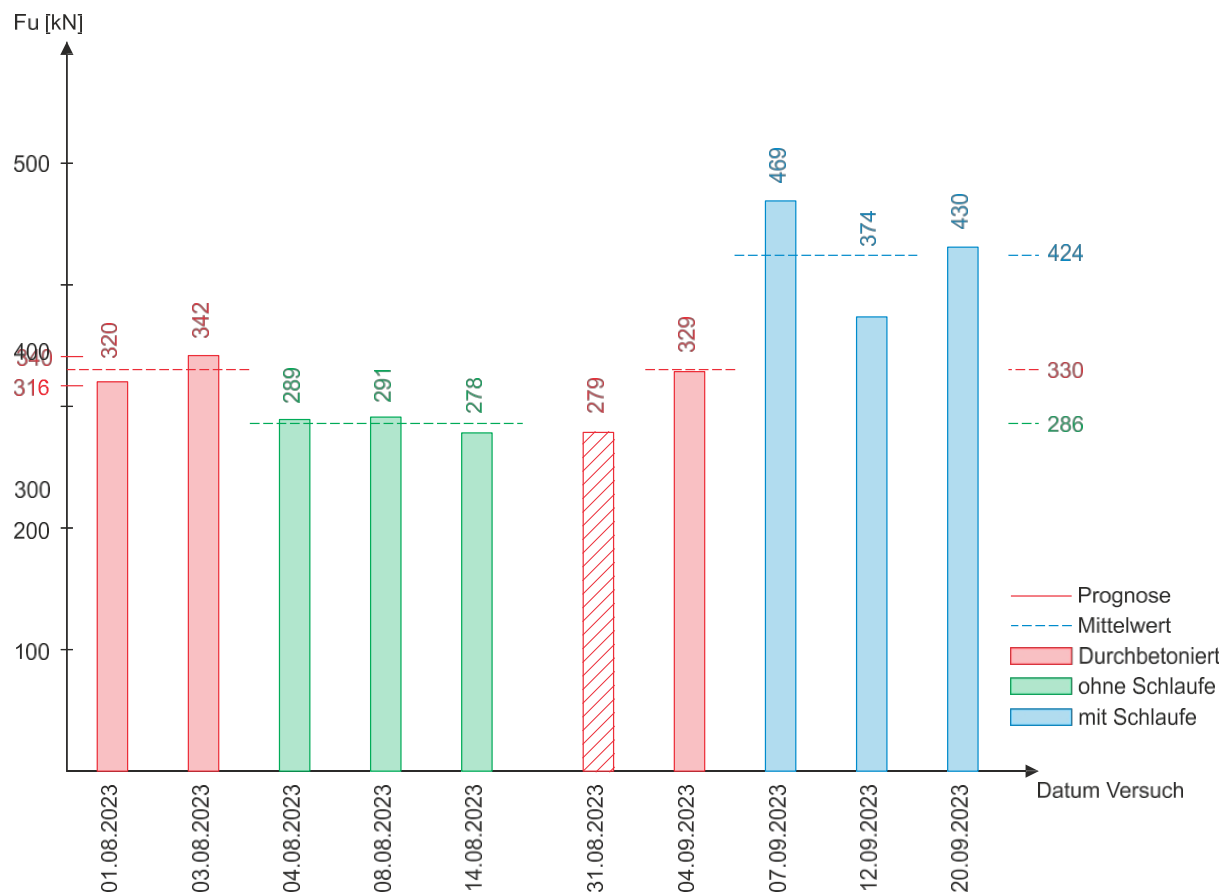


Figure 48 : Aperçu de la charge maximale des différents éléments de test.

Le deuxième groupe est constitué des charges de rupture des éprouvettes représentées en vert, dans lesquelles un élément de coffrage sans armature d'effort tranchant été installé. Les charges de rupture des trois essais, avec une valeur moyenne de 286 kN, sont inférieures aux valeurs de référence ; le résultat correspond aux prévisions du chapitre 7.2.

Le troisième groupe regroupe les résultats, représentés en bleu, des éléments d'essai qui présentent un élément de coffrage avec renforcement de l'effort tranchant. Les charges de rupture nettement plus élevées que celles des essais de référence, avec une valeur moyenne de 424 kN, confirment pleinement l'efficacité du renforcement de l'effort tranchant et de la protection contre l'effort tranchant, compte tenu des mécanismes de défaillance constatés dans les essais en dehors de la zone de coffrage (formation d'une deuxième fissure d'effort tranchant). Il s'avère en outre que l'imbrication des fissures doit effectivement fournir une contribution essentielle. Avec les dimensions des matériaux déterminées au chapitre 6.1 pour l'armature en boucles, on peut calculer une force de rupture de 322 kN pour les dix fers verticaux de l'armature en boucles ; la différence avec la charge de rupture de 424 kN doit se faire par le biais de la denture de la fissure.

## 10.2 Conclusion

En résumé, les essais et analyses effectués sur des dalles de béton d'une hauteur de 30 cm montrent que le renforcement de l'effort tranchant de l'élément de coffrage par une armature ondulée n'entraîne pas de diminution de la résistance à l'effort tranchant pour la présente qualité de béton. Lors de ces essais, la fissure d'effort tranchant responsable de la rupture s'est toujours produite à l'extérieur de l'élément de coffrage, ce qui se traduit par une résistance accrue à l'effort tranchant. La formation habituelle d'une première fissure est bloquée par l'armature d'effort tranchant. Cela montre que la résistance à l'effort tranchant dans cette zone peut être augmentée par l'interaction entre la denture de la fissure et l'armature ondulée.

Avec l'élément de coffrage posé sans renforcement de l'effort tranchant, la valeur de référence des essais bétonnés n'a pas pu être tout à fait atteinte, ce qui renforce encore la pertinence du renforcement de l'effort tranchant dans l'élément de coffrage.

Dans l'ensemble, l'étude de faisabilité montre que l'élément de coffrage développé, y compris l'armature en boucle, représente une solution prometteuse pour les joints de construction dans les dalles sans armature d'effort tranchant grâce à une réduction inexistante de la résistance à l'effort tranchant dans le joint. Il est toutefois important de noter que les résultats ne sont valables que pour les dalles de béton d'une hauteur de 30 cm et le béton étudié. Pour d'autres épaisseurs de dalles ou des bétons aux propriétés différentes, des études supplémentaires sont nécessaires.

## Bibliographie

- [1] AASHTO LRFD, Bridge design specifications and commentary, 5e édition, 2010, 301 pages.
- [2] Amer, E. ; Mémoire de Master, Comparaison de différentes conceptions de modèles pour le comportement à l'effort tranchant d'éléments de construction en béton armé, 2024, 88 pages.
- [3] Amer, E. ; travail de bachelor, résistance au cisaillement du béton, 2021, 90 pages.
- [4] Amer, E. ; Travail d'approfondissement 2, Etude de faisabilité pour le développement d'un élément de coffrage sans perte de transmission de l'effort tranchant dans des dalles sans armature d'effort tranchant, 2023, 56 pages.
- [5] Bentz, E. C., Vecchio, F. J. et Collins, M. P., ACI Structural Journal, Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements, 2006, vol. 103, pages 2235-2350.
- [6] CEB-fib, fib Model Code for Concrete Structures, 2010, 436 pages.
- [7] Comité CSA, Conception des structures en béton, A23.3-19, 2019, 301 pages.
- [8] Collins, M.P. et Vecchio, F.J. ; ACI Structural Journal, The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, 1986, vol. 83, pp, n° 2, pages 219-231.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ; Cahier 525 - Explications relatives à la norme DIN 1045-1 ; 2010 ; 162 pages.
- [10] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Structures porteuses en béton, béton armé et béton précontraint -Partie 1 : Dimensionnement et construction ; 2001 ; 148 pages.
- [11] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Structures porteuses en béton, béton armé et béton précontraint -Partie 1 : Dimensionnement et construction ; 2008 ; 183 pages.
- [12] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2 : Dimensionnement et construction de structures en béton armé et en béton précontraint - Partie 1-1 : Règles générales de dimensionnement et règles pour la construction de bâtiments ; Version allemande EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 ; 2011 ; 241 pages.
- [13] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1992-1-1/NA, Paramètres fixés au niveau national - Eurocode 2 : Dimensionnement et construction de structures en béton armé et en béton précontraint - Partie 1-1 : Règles générales de dimensionnement et règles pour la construction de bâtiments(S'applique en combinaison avec DIN EN 1992-1-1 (2011-01)) ; 2011 ; 201 pages.
- [14] Deutsches Institut für Normung, DIN 1045-1, Eurocode 2 : Dimensionnement et construction de structures en béton armé et en béton précontraint - Partie 1-1 : Règles générales de dimensionnement et règles pour la construction de bâtiments ; version allemande EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 ; 2011 ; 241 pages.
- [15] Norme européenne, évaluation de la résistance à la compression du béton dans les ouvrages et les parties d'ouvrages ; version allemande DIN EN 13791:2020-02 ; 2020, 48 pages.

- [16] Muttoni, A. ; Beton- und Stahlbetonbau, Schubfestigkeit und Durchstanzen ohne Querkraftbewehrung, 2003, Vol. 2, Nr. 98, pages 74-84.
- [17] Muttoni, A. et Ruiz, M.F., ACI Structural Journal, Shear Strenght of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width, 2008, Vol. 105, pages 163-172.
- [18] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA ; Norme SIA 262 - Construction en béton ; 2013 ; 102 pages.
- [19] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA ; Norme SIA 262 - Construction en béton ; 2003 ; 90 pages.
- [20] Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA ; Norme SIA 162 - Constructions en béton (révision partielle de l'édition 1989) ; 1993 ; 86 pages.
- [21] Walraven, J.C., G ; ASCE, Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, 1981, n° 107, pages 2256-2270.
- [22] Zilch, K et Fingerloos, F ; Bauingenieur, Schubkraftübertragung in Verbundfugen nach DIN 1045-1:2008, 2008, Bd. 83, Nr. 5, Seiten 212-219.
- [23] Zilch, K et Zehetmaier, G ; Bemessung im konstruktiven Betonbau, 2010, 627 pages.