

DIB

Classification : –

Résistance aux projectiles

des vitrages de la salle de commande

et des panneaux composites de la façade

Votre signe :	J.-P. Meusy	Référence :	DIB	Responsable :	A. Koch / F. Ubertini
Notre signe :	A. Koch / F. Ubertini	No identification :	26042011	Téléphone :	+41(0)21 732 10 36
Requête technique :	J.-P. Meusy	Remarque :	–	E-mail :	andrejoseph.koch@gmail.com

Résumé

Ce travail concerne la résistance aux projectiles du vitrage de la salle de commande et des façades Nord, Est et Sud de la halle d'excavation. Ses résultats confirment et étayent ceux du rapport de Tecova AG.

Vitrage de la salle de commande. Les vitres de la salle de commande, de type BR4-S, offrent une protection efficace contre des projectiles pierreux de moins de 500 g et contre des projectiles métalliques de moins de 140 g (énergie cinétique inférieure à 1505 J).

Si la masse la plus probable du projectile métallique le plus lourd excède 140 g, il faut augmenter la protection balistique lors de travaux d'excavation au voisinage de la salle de commande. Par exemple, pour des projectiles ferreux de 200 g, la distance critique au poste de commande est de 30 m.

Panneaux composites des façades et du toit de la halle. Les façades Nord, Sud et Est de la halle d'excavation ainsi que son toit sont formés de panneaux composites dont la résistance à la perforation est estimée numériquement. Ces panneaux offrent une protection efficace contre les projectiles minéraux ou ferreux de moins de 500 g. L'explosion du 7 juillet 2010 a cependant prouvé que leur perforation est possible.

Durant les travaux dans la halle d'excavation, il sera prudent de limiter au strict minimum la présence de personnel à proximité de ces parois ou sur le toit de la halle.

Divers. La halle d'excavation comporte plusieurs fenêtres donnant sur l'extérieur. Ces ouvertures constituent des points faibles en cas d'explosion dans la halle. On évitera donc la présence de personnel ou de matériel sensible en face de ces fenêtres.

Distribution du rapport

- Jean-Pierre Meusy, responsable du dossier DIB
République et Canton du Jura
2800 Delémont

- Office de l'Environnement
République et Canton du Jura
2882 Saint-Ursanne

Modifications

Version	Date	Description, Remarque	Nom
1.01	25 avril 2011	Première version du rapport	André Koch
1.02	1 ^{er} mai 2011	Précision : panneaux de la toiture plus faibles (§2.1 et §2.3)	André Koch



Dr André Koch
Chemin de Palud 2
CH-1053 Cugy
Tél. +41(0)21 732 10 36
E-mail : andrejoseph.koch@gmail.com



Dr François Ubertini
Chemin de la maison blanche 2A
CH-2533 Évilard
Tél. +41(0)32 322 77 85
E-mail : fubertini@gmail.com

Table des matières

Résumé	5
Résistance aux projectiles des vitres de la salle de commande	5
Résistance des panneaux composites de la halle	5
Remarque	5
1 Résistance aux projectiles des vitrages de la salle de commande	7
1.1 Certificat de protection balistique du vitrage de la salle de commande	7
1.2 Protection balistique du vitrage de la salle de commande	7
1.3 Résumé	8
2 Résistance aux projectiles des panneaux composites	8
2.1 Structure des panneaux composites	8
2.2 Protection balistique des panneaux composites	8
2.3 Résumé	9
Annexes	10
A Projectiles	10
A.1 Vitesse de projection	10
A.1.1 Projection par un explosif solide	10
A.1.2 Projection par un explosif “dilué”	11
A.1.3 Vitesse initiale du projectile	12
A.2 Balistique extérieure des projectiles	13
A.3 Impact normal du projectile sur une cible	14
A.4 Comparaison des résultats de <i>Tecova AG</i> avec ceux du présent travail	16
A.5 Distance de sécurité	17
B Certificats pour l’impact de balles des vitrages du poste de commande	18
C Structure des panneaux composites	21

Cette page est intentionnellement laissée vide.

Résumé

Ce travail concerne la résistance aux projectiles du vitrage de la salle de commande et des façades Nord, Est et Sud de la halle d'excavation. Ses résultats confirment et étayent ceux du rapport de Tecova AG.

Résistance aux projectiles des vitres de la salle de commande

- Les fenêtres de la salle de commande se composent d'une vitrage balistique de type BR4-S posé devant une vitre pare-flamme EI30.
- Une protection BR4-S arrête un projectile *Magnum .44* ($M = 15.55 \text{ g}$, $v_0 = 440 \text{ m/s}$) tiré à 3 m (l'énergie absorbée au moment de l'impact est de 1505 J).
- Aux vitesses attendues, les vitrages de la salle de commande présentent un bon niveau de protection contre des projectiles pierreux de moins de 500 g.
- Pour les projectiles métalliques cylindriques de masse supérieure à 140 g, il faut s'attendre à la perforation du vitrage lorsque l'explosion a lieu à 12 m des fenêtres.
- Pour des travaux d'excavation à proximité des fenêtres de la salle de commande, des mesures de sécurité supplémentaires seraient judicieuses (*distance de sécurité* à déterminer en fonction de la masse la plus probable du projectile le plus lourd ; exemple : projectiles métalliques de 200 g \implies distance de sécurité de 30 m).

Résistance aux projectiles des panneaux composites de la halle

- Les parois latérales Nord, Sud et Est de la halle d'excavation ainsi que son toit sont formés de panneaux composites (sandwich tôle/polyuréthane/tôle), dont la résistance à la perforation est estimée numériquement.
- Ces panneaux composites offrent une protection efficace contre les projectiles minéraux ou ferreux de moins de 500 g.
- L'explosion du 7 juillet 2010 a montré que la perforation de ces panneaux n'est pas exclue (deux trous de la taille du poing dans le toit de la halle).
- Durant les travaux dans la halle d'excavation, il sera prudent de limiter au strict minimum la présence de personnel à proximité de ces parois ou sur le toit de la halle.

Remarque

La halle d'excavation comporte plusieurs fenêtres donnant sur l'extérieur. Ces fenêtres qui constituent des points potentiellement faibles en cas d'explosion dans la halle. On veillera donc à éviter la présence de personnes ou du matériel sensible dans leurs alentours lors des travaux d'excavation ou lors d'une intervention suite à un incident ou accident dans la halle.

Cette page est intentionnellement laissée vide.

1 Résistance aux projectiles des vitrages de la salle de commande

Les estimations qui suivent ne concernent que les vitres de la salle de commande.

La halle d'excavation comporte plusieurs fenêtres donnant sur l'extérieur. Les caractéristiques de leur vitrage nous étant inconnues, les conclusions de ce rapport ne concernent pas ces fenêtres qui constituent des points potentiellement faibles en cas d'explosion dans la halle. On veillera donc à éviter la présence de personnes ou du matériel sensible dans leurs alentours lors des travaux d'excavation ou lors d'une intervention suite à un incident ou accident dans la halle.

1.1 Certificat de protection balistique du vitrage de la salle de commande

Le vitrage de protection balistique de la salle de commande est de type BR4-S selon la norme EN 1063 ou de type C3SA selon DIN 52290 (voir les certificats dans l'annexe B). Les niveaux de protection balistique sont reproduits dans la figure 1.

			EN 1063				DIN 52290 part 2			
Calibre	Tir		Catégorie de tir		Distance de tir (m)	Vitesse (m/s)	Catégorie de tir		Distance de tir (m)	Vitesse (m/s)
	*) Typ	Volume (g)	avec éclats	sans éclats			avec éclats	sans éclats		
.22LR	L/RN	2,6 ± 0,10	BR1-S	BR1-NS	10	360 ± 10				
9 mm x 19	VMR/Wk	8,0 ± 0,10	BR2-S	BR2-NS	5	400 ± 10	C1SA	C1SF	3	355-365
.357 Magn.	VMKS/Wk	10,25 ± 0,10	BR3-S	BR3-NS	5	430 ± 10	C2SA	C2SF	3	415-425
.44 Magn.	VMF/Wk	15,55 ± 0,10	BR4-S	BR4-NS	5	440 ± 10	C3SA	C3SF	3	435-445
5,56 x 45	FJ/PB/SCP1	4,0 ± 0,10	BR5-S	BR5-NS	10	950 ± 10				
7,62 x 51	VMS/Wk	9,45 ± 0,10	BR6-S	BR6-NS	10	830 ± 10	C4SA	C4SF	10	785-795
7,62 x 51	VMS/Hk	9,75 ± 0,10	BR7-S	BR7-NS	10	820 ± 10	C5SA	C5SF	25	800-810
Flinte 12/70	Brenneke	31,0 ± 0,50	SG1-S**)	SG1-NS**)	10	420 ± 20				
Flinte 12/70	Brenneke	31,0 ± 0,50	SG2-S	SG2-NS	10	420 ± 20				

*)	FJ:	Balle blindée	VMF/Wk:	Douille renforcée
	L:	Plomb	VMKS/Wk:	Balle blindée à tête cylindrique à noyau tendre
	PB:	Balle à tête pointue	VMR/Wk:	Balle blindée à tête cylindrique à noyau tendre
	RN:	Balle la tête cylindrique	VMS/Hk:	Balle blindée à tête cylindrique à noyau dur
	SCP1:	Noyau tendre avec armature acier	VMS/Wk:	Balle blindée à tête cylindrique à noyau tendre
**)	Le contrôle s'effectue avec un seul tir			

Figure 1 – Niveaux de protection balistique selon les normes EN 1063 et DIN 52290.

1.2 Protection balistique du vitrage de la salle de commande

Sur la base des caractéristiques de protection balistique, on a estimé la résistance des vitrages de la salle de commande à l'impact des projectiles suivants :

- des projectiles pierreux sphériques de masses égales à 100 g, 250 g, 500 g et 1000 g (diamètre entre 42 mm et 91 mm)
- des projectiles métalliques cylindriques minces, de masses égales à 100 g, 250 g, 500 g et 1000 g (diamètre entre 57 mm et 180 mm ; épaisseur du cylindre 5 mm).

Les projectiles sont mis en mouvement par l'explosion d'une charge de 10 kg de TNT. Pour le calcul, on admet, entre lieu de l'explosion et vitrage de la salle de commande, une distance minimale de 12 m. Les résultats sont regroupés dans la table suivante (pour les détails techniques, se reporter à l'annexe A).

Résistance à l'impact d'un vitrage BR4-S/C3SA

Cailloux sphériques					Cylindres en acier				
M [g]	d [mm]	v_{12} [m/s]	E_{12} [kJ]	Résultat	M [g]	d [mm]	v_{12} [m/s]	E_{12} [kJ]	Résultat
100	42	85	0.4	OK	100	57	145	1.0	OK
250	58	86	0.9	OK	250	90	216	5.8	perforé
500	73	86	1.8	critique	500	128	285	20.5	perforé
1000	91	86	3.7	perforé	1000	180	369	67.9	perforé

M : masse du projectile

d : diamètre du projectile

Résultat : état du vitrage après l'impact du projectile

v_{12} : vitesse du projectile à 12 m

E_{12} : énergie du projectile à 12 m

1.3 Résumé

- Aux vitesses attendues, les vitrages de la salle de commande présentent un bon niveau de protection contre des projectiles pierreux de moins de 500 g. Comme l'explosif n'est pas confiné, ces résultats ne dépendent que faiblement de sa masse (résultats analogues pour 10, 20, 40 kg de TNT).
- Pour les projectiles métalliques cylindriques de masse supérieure à 140 g, il faut s'attendre à la perforation du vitrage lorsque l'explosion a lieu à 12 m des fenêtres. Comme l'explosif n'est pas confiné, ces résultats ne dépendent que faiblement de sa masse.
- Il sera prudent de fixer une distance de sécurité entre les travaux et le poste de commande. Pour des travaux d'excavation en deçà de cette distance, des mesures de sécurité supplémentaires seront à prévoir. Le choix de cette distance de sécurité dépend de la masse probable du projectile le plus lourd (exemple : pour se protéger de projectiles métalliques de 200 g, la distance de sécurité est de 30 m).

2 Résistance aux projectiles des panneaux composites

Les parois latérales Nord, Sud et Est de la halle d'excavation (figure 2) ainsi que son toit sont formés de panneaux composites, dont la résistance à la perforation par des projectiles a été estimée numériquement.

2.1 Structure des panneaux composites

La structure en coupe d'un panneau composite de la paroi de la halle est reproduite dans l'annexe C ; elle comprend une couche de 60 mm de polyuréthane entre deux plaques de tôle de 0.50 mm (face interne) et 0.63 mm (face externe).

2.2 Protection balistique des panneaux composites

La résistance à la perforation des panneaux composites est évaluée à l'aide de simulations numériques pour les mêmes projectiles que ci-dessus (cf. § 1.2), accélérés par l'explosion de 10 kg de TNT. Les résultats sont regroupés dans la table suivante (pour les détails, voir annexe A).

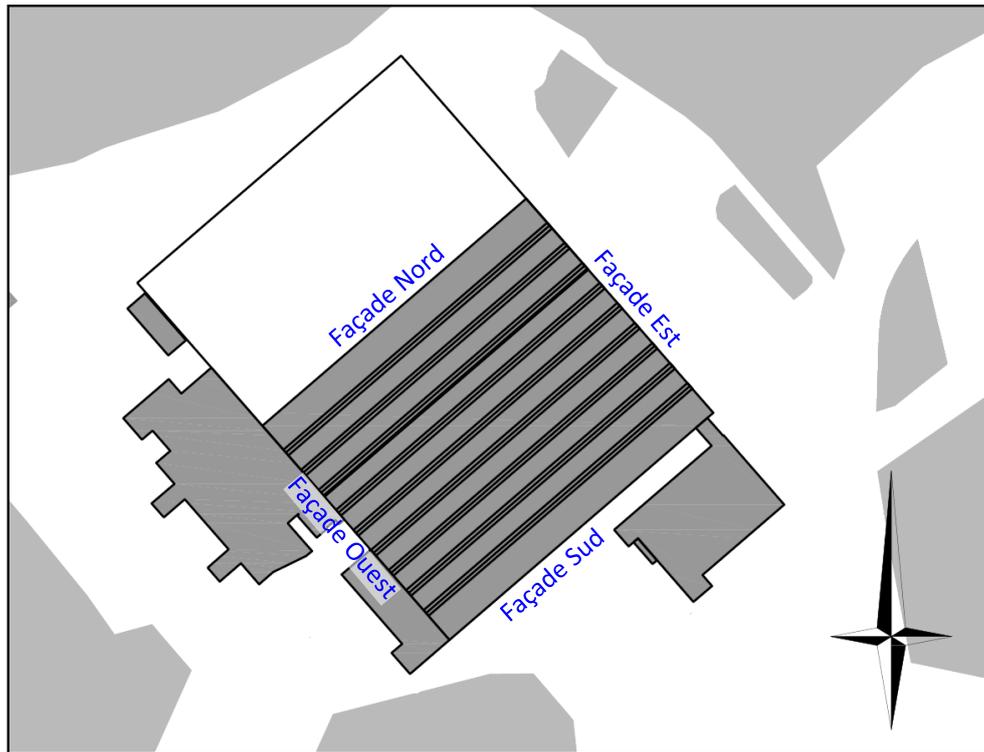


Figure 2 – Dénomination des façades de la halle d'excavation.

Résistance à l'impact de la paroi de la halle

Cailloux sphériques					Cylindres en acier				
M [g]	d [mm]	v_0 [m/s]	v_{12} [m/s]	Résultat	M [g]	d [mm]	v_0 [m/s]	v_{12} [m/s]	Résultat
100	42	88	85	OK	100	57	198	145	OK
250	58	88	86	OK	250	90	293	216	OK
500	73	88	86	OK	500	128	389	285	limite
1000	91	88	86	OK	1000	180	501	369	perforé (70 m/s)

M : masse du projectile

d : diamètre du projectile

Résultat : état du vitrage après l'impact du projectile, avec, éventuellement, la vitesse résiduelle du projectile derrière l'obstacle

v_0 : vitesse initiale du projectile

v_{12} : vitesse du projectile à 12 m

2.3 Résumé

- Les panneaux composites formant les parois et le toit de la halle d'excavation offrent un bon niveau de protection contre des projectiles pierreux.
- Pour les projectiles métalliques cylindriques de masse supérieure ou égale à 500 g, il faut s'attendre à la perforation des panneaux composites.

Lors de l'explosion du 7 juillet 2010, deux projectiles ont perforé la toiture de la halle. Les trous observés, de la taille du poing, laissent penser qu'il s'agissait de projectiles de quelques centaines de grammes (il faut préciser que les panneaux composites de la toiture offrent moins de résistance à la perforation que ceux des parois latérales, parce qu'ils ne comportent qu'une seule surface de tôle, contre deux surfaces de tôle pour les panneaux latéraux).

Annexes

A Projectiles

L'évaluation des effets de balistique terminale d'un projectile sur diverses cibles (vitrages ou panneau composite de la halle) s'effectue avec les étapes de calcul suivantes :

1. Estimation de la vitesse initiale du projectile accéléré par l'explosif (§ A.1)
2. Balistique extérieure du projectile (§ A.2)
3. Impact sur la cible : vitrage ou panneau composite (§ A.3).

A.1 Vitesse de projection

La détermination de la vitesse de projection est le point le plus délicat du calcul balistique. De nombreuses hypothèses sont nécessaires pour estimer la vitesse initiale v_0 du projectile mis en mouvement par l'explosion.

A.1.1 Projection par un explosif solide

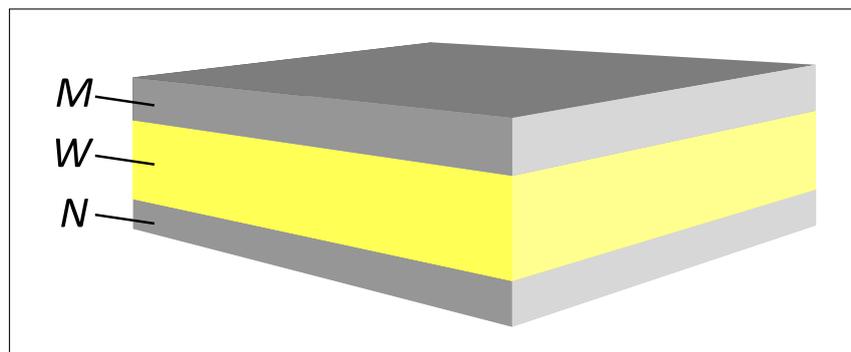


Figure 3 – Système de Gurney plan. L'explosif de masse W est intercalé entre deux plaques inertes de masses M et N . Idéalement, les plaques ont une extension latérale infinie, de sorte que l'on n'a pas de problèmes aux bords.

La vitesse de projection v_0 d'un objet se détermine par un bilan d'énergie et de quantité de mouvement ; la relation obtenue pour un système plan (figure 3), dite *formule de Gurney*, est reproduite ci-dessous* :

$$v_0 = \frac{v_G}{\sqrt{\frac{1+A^3}{3(1+A)} + \frac{N}{W}A^2 + \frac{M}{W}}} \quad \text{avec} \quad A = \frac{1+2M/W}{1+2N/W} \quad (1)$$

Dans cette expression, v_G est un paramètre dépendant de la nature de l'explosif. Une bonne approximation de v_G est

$$v_G = \frac{D_{CJ}}{3} \quad (2)$$

* *Explosive Engineering*, Paul W. Cooper, Wiley-VCH (1996)

où D_{CJ} est la vitesse de détonation de l'explosif considéré. Lorsque l'extension latérale des plaques inertes est faible devant l'épaisseur totale du système, on corrige la valeur W de la masse l'explosif pour tenir compte des effets de bord : on ne retient que la masse de l'explosif contenue à l'intérieur de l'intersection des deux cônes droits dont les bases correspondent aux plaques inertes et d'ouverture moyenne au sommet égale à 60° (figure 4).

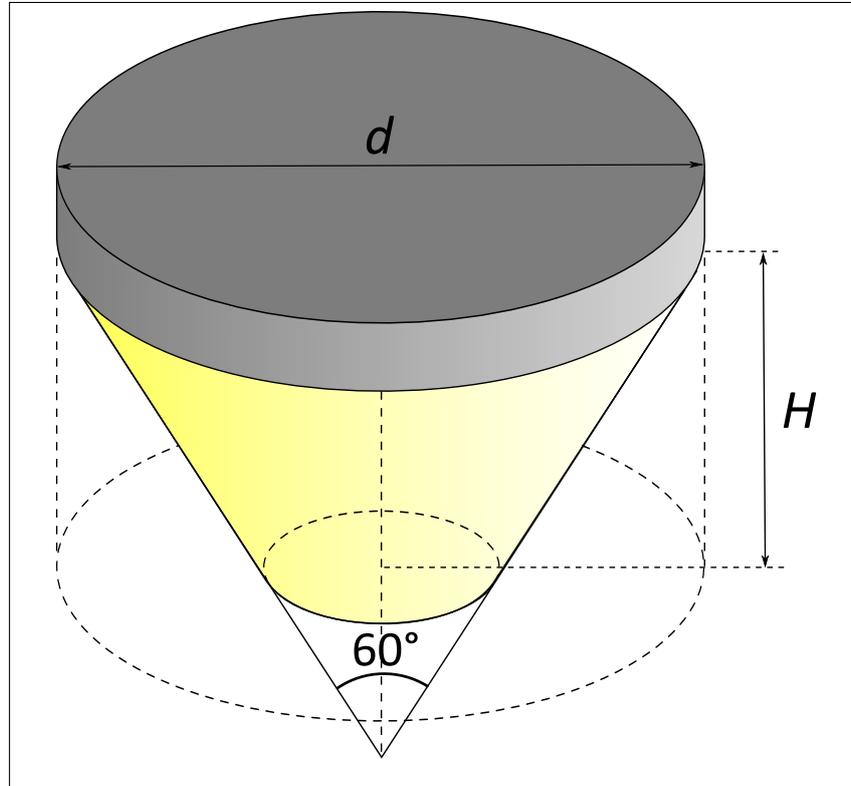


Figure 4 – Exemple de géométrie de Gurney pour laquelle les bords jouent un rôle. Un cylindre d'explosif de hauteur H et de diamètre d est couvert d'une plaque inerte. On admet que $d \approx H$; dans un tel cas, ne participe à l'accélération de la plaque inerte que la masse W de l'explosif contenue dans l'intersection du volume effectif de l'explosif et du cône d'ouverture moyenne au sommet égale à 60° .

Lorsque la géométrie du système est cylindrique (corps explosif de masse W entouré d'un revêtement cylindrique inerte de masse M), la relation (1) est remplacée par

$$v_0 = \frac{v_G}{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{M}{W}}} . \quad (3)$$

A.1.2 Projection par un explosif “dilué”

La vitesse de détonation d'un explosif solide dépend de sa densité ρ . Lorsque celle-ci s'écarte de la valeur nominale de l'explosif en question, il faut corriger la vitesse de détonation D_{CJ} . Par exemple, pour le TNT, on a approximativement[†] :

$$D_{CJ}(\rho) = 1670 + 3.342 \rho \quad (4)$$

(D_{CJ} en m/s et ρ en kg/m^3).

[†] *Explosive Engineering*, Paul W. Cooper, Wiley-VCH (1996)

Dans le cas de l'explosion du 7 juillet 2010 dans la décharge de Bonfol, on a estimé que la densité d'énergie du matériau ayant réagi était de l'ordre de 1 MJ/kg, soit approximativement le quart de la densité d'énergie admise pour le TNT (4.185 MJ/kg pour une densité nominale de $\rho_0 = 1630 \text{ kg/m}^3$ et une vitesse de détonation égale à $D_{CJ} = 6860 \text{ m/s}$). Les deux raisonnements qui suivent sont soutenables.

1. Le matériau énergétique ayant explosé est assimilable à du TNT "dilué" d'un facteur 4. Pour obtenir la densité d'énergie adéquate, on choisit donc de faire les calculs avec du TNT de densité effective $\rho_1 = \rho_0/4$. Dans ce cas, avec (4), on obtient pour la vitesse de détonation effective $D_{CJ \text{ eff}} = 3030 \text{ m/s}$.
2. Lors d'une détonation, l'énergie libérée est proportionnelle au carré de la vitesse de détonation. Pour réduire cette énergie d'un facteur 4, il faut diminuer la vitesse de détonation D_{CJ} d'un facteur 2, soit $D_{CJ \text{ eff}} = 3430 \text{ m/s}$.

Nous continuerons ci-dessous avec le cas le plus défavorable pour la sécurité, soit $D_{CJ \text{ eff}} = 3430 \text{ m/s}$. Avant de continuer, remarquons que cette vitesse est largement supérieure l'estimation des experts de la police scientifique de Zurich, soit 1–2 km/s[‡].

A.1.3 Vitesse initiale du projectile

Em principe, deux cas sont à considérer :

- l'explosion a lieu dans le broyeur (*shredder*)
- l'explosion a lieu lors des travaux d'excavation dans la halle ou lors de la manipulation des déchets dans l'un des bacs au voisinage du broyeur.

Cette distinction est nécessaire en raison du confinement différent du matériau énergétique dans ces deux situations. Ce rapport ne s'intéresse qu'au second cas ; l'explosion dans le broyeur sera traitée ultérieurement.

Pour fixer les idées, on déterminera les vitesses initiales des projectiles suivants : des *cailloux sphériques* (densité 2500 kg/m^3) et des *plaques métalliques* (densité 7830 kg/m^3) de 5 mm d'épaisseur. Pour le calcul, on a choisi des masses de 100 g, 250 g, 500 g et 1000 g (des masses supérieures sont peu probables, la détonation tendant à fragmenter les grandes structures).

Explosion lors de l'excavation ou dans un bac. Le système n'étant pas confiné, seule la masse d'explosif contenue dans une pyramide s'appuyant sur le projectile (figure 4) participe à l'accélération de ce dernier. Pour simplifier le calcul, on admettra que la base de la pyramide correspond à la section du projectile. La table suivante présente les vitesses initiales v_0 calculées avec (1) par les divers types de projectiles retenus, ainsi que l'énergie cinétique E_p correspondante.

[‡]Rapport *Hypothesen zum Explosionsereignis des 7. Juli 2010 bei der Sanierung der Deponie in Bonfol*, version du 19.10.2010, p.12/25, § 4.2.1 : "Gemäss Aussagen der Experten des Forensischen Instituts spricht die geschätzte langsame Umsetzungsgeschwindigkeit der Explosion von 1–2 km/s gegen einen militärischen Sprengstoff". Cette remarque n'est plus mentionnée dans la version du 10.02.2011 de ce rapport.

Cailloux sphériques ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$)

Diamètre projectile d [mm]	Masse projectile M [g]	Masse explosif W [g]	Vitesse initiale v_0 [m/s]	Energie initiale E_p [J]
42	100	10	88	390
58	250	24	88	970
73	500	48	88	1 940
91	1 000	93	88	3 877

Dans ce qui précède, la vitesse de projection reste constante parce que la géométrie fixe $M/W = 10.75$.

Projectiles cylindriques en acier ($\rho_p = 7830 \text{ kg/m}^3$)

Diamètre projectile d [mm]	Masse projectile M [g]	Masse explosif W [g]	Vitesse initiale v_0 [m/s]	Energie initiale E_p [J]
57	100	23	198	1 967
90	250	90	293	10 702
128	500	258	389	38 050
180	1 000	718	501	125 020

Pour ces projectiles cylindriques d'épaisseur constante, la vitesse de projection augmente avec le diamètre d des plaques inertes ($1.39 \leq M/W \leq 4.35$).

A.2 Balistique extérieure des projectiles

La distance minimale entre le lieu où une explosion peut se produire (à l'exception du broyeur) et les parois de la halle est de l'ordre de 12 m. La vitesse $\vec{v}(t)$ des projectiles au temps t et à la position $\vec{x}(t)$ relativement au lieu de l'explosion est estimée par les lois de la balistique extérieure :

$$M \frac{d}{dt} \vec{v}(t) = -M \vec{g} - \frac{C_w(R(t))}{2} \rho_{\text{air}} S v(t) \vec{v}(t) \quad (5)$$

$$v(t) = \sqrt{\vec{v}(t) \cdot \vec{v}(t)} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \vec{x}(t) = \vec{v}(t) . \quad (7)$$

Dans ces équations, \vec{g} représente l'accélération gravifique, M et S sont la masse du projectile et sa section normale à la trajectoire ; ρ_{air} est la densité de l'air. Enfin, $C_w(R)$ est le coefficient de traînée aérodynamique du projectile, qui est fonction du nombre de Reynolds R :

$$R(t) = \frac{\rho_{\text{air}} v(t) d}{\mu} \quad (8)$$

où μ est la viscosité de l'air et d le diamètre de la section du projectile. $C_w(R)$ dépend de la forme du projectile. Pour le calcul numérique avec des projectile sphériques, on a utilisé :

$$C_w(R) = \begin{cases} \frac{24}{R} (1 + 0.15 R^{0.687}) & \text{si } R \leq 1\,000 \\ 0.44 & \text{si } 1\,000 < R \leq 200\,000 \\ 0.1 & \text{si } 200\,000 < R . \end{cases} \quad (9)$$

Cette forme est requise, parce que, pour certains projectiles, le nombre de Reynolds varie sensiblement sur la trajectoire.

Pour les projectiles cylindriques, comme le nombre de Reynolds demeure élevé sur toute la trajectoire, on s'est contenté de

$$C_w = 1.17 . \quad (10)$$

Les caractéristiques suivantes de l'air ont été admises :

$$\rho_{\text{air}} = 1.22 \text{ kg/m}^3 \quad \text{and} \quad \mu = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s} . \quad (11)$$

La table suivante regroupe les valeurs obtenues par résolution numérique des équations (5–8) avec un angle d'élevation initial de 45° ; en plus des valeurs initiales de la vitesse et de l'énergie cinétique, on a encore reporté ces mêmes grandeurs à 12 m et à la portée maximale x_{max} atteinte par le projectile en vol libre, sans vent, sur un terrain horizontal libre d'obstacles.

Cailloux sphériques ($\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$)

Masse projectile M [g]	Valeurs initiales		Valeurs à 12 m		Valeurs à x_{max}		
	v_0 [m/s]	E_0 [J]	v_{12} [m/s]	E_{12} [J]	x_{max} [m]	v_{max} [m/s]	E_{max} [J]
100	88	390	85	367	358	42	90
250	88	970	86	921	513	49	296
500	88	1 940	86	1 850	610	69	1 208
1000	88	3 877	86	3 711	639	72	2 613

Enfin, la table suivante reporte les mêmes grandeurs pour un projectile métallique en forme de plaque cylindrique mince.

Projectiles cylindriques en acier ($\rho_p = 7830 \text{ kg/m}^3$)

Masse projectile M [g]	Valeurs initiales		Valeurs à 12 m		Valeurs à x_{max}		
	v_0 [m/s]	E_0 [J]	v_{12} [m/s]	E_{12} [J]	x_{max} [m]	v_{max} [m/s]	E_{max} [J]
100	198	1 967	145	1 053	134	22	25
250	293	10 702	216	5 784	151	23	64
500	389	38 050	285	20 493	163	23	131
1000	501	125 020	369	67 898	174	23	262

A.3 Impact normal du projectile sur une cible

À 12 m du point de détonation, le projectile percute une cible dont la surface est perpendiculaire à sa trajectoire (cas le plus défavorable du point de vue de la sécurité). On considère deux types de cibles : (a) une surface en verre et (b) une structure composite comparable à celle des parois Nord, Sud et Est de la halle.

Surface en verre. La surface considérée est celle du vitrage blindé de la salle de commande.

Selon les certificats fournis par *bci*, ce vitrage est de classe BR4-S selon la norme EN 1063, ou C3SA selon la norme DIN 52290. Ceci signifie que le vitrage résiste à l'impact d'une balle de type *Magnum .44*, de 15.55 g, animée de 440 m/s. L'énergie cinétique absorbée par ce vitrage lors de l'impact est de 1505 J.

Le vitrage se brise par formation de fractures, dont la vitesse c_f est de l'ordre de $0.4 c_L$ [§] avec $c_L \approx 5600 \text{ m/s}$, soit $c_f \approx 2240 \text{ m/s}$. Tant que la vitesse du projectile au moment de l'impact est très inférieure à c_f , on peut admettre que l'énergie délivrée à la vitre est déterminante pour sa rupture[¶]. Pour les projectiles considérés précédemment, on a obtenu les résultats regroupés dans le tableau suivant (avec les appréciations suivantes : *OK* : le vitrage résiste ; *critique* : l'énergie du projectile est du même ordre de grandeur que l'énergie délivrée par la balle de *Magnum .44* ; *rompu* : le projectile, ayant une énergie supérieure à celle de la balle de *Magnum .44*, peut éventuellement perforer le vitrage).

[§] *Impact Strength of Materials*, W. Johnson, Edward Arnold Ed. (1972).

[¶] Dr. B. Kneubühl, Université de Berne, Institut für Rechtsmedizin, communication privée.

Résistance à l'impact d'un vitrage BR4-S/C3SA

Cailloux sphériques				Cylindres en acier			
M [g]	v_0 [m/s]	E_{12} [kJ]	Résultat	M [g]	v_0 [m/s]	E_{12} [kJ]	Résultat
100	88	0.37	OK	100	198	1.05	OK
250	88	0.92	OK	250	293	5.78	perforé
500	88	1.85	critique	500	389	20.49	perforé
1000	88	3.71	perforé	1000	501	67.90	perforé

Ces résultats montrent qu'on peut s'attendre à un bon niveau de protection pour des projectiles pierreux de moins de 500 g. Pour les projectiles métalliques cylindriques, la masse critique se situe vers 140 g.

Surface composite La paroi de la halle se compose d'une structure en sandwich, une plaque de 60 mm de polyuréthane étant montée entre deux tôles de 0.50 mm et 0.63 mm. Pour estimer sa résistance à l'impact, on a mené deux séries de calculs numériques, d'une part avec des projectiles pierreux sphériques (figure 5) et d'autre part avec des cylindres métalliques (figure 6). Ces simulations montrent que la réduction de vitesse au passage de l'obstacle est fonction de la forme, de la masse et de l'énergie initiale du projectile. Les résultats pour les projectiles de référence sont regroupés dans la table ci-dessous.

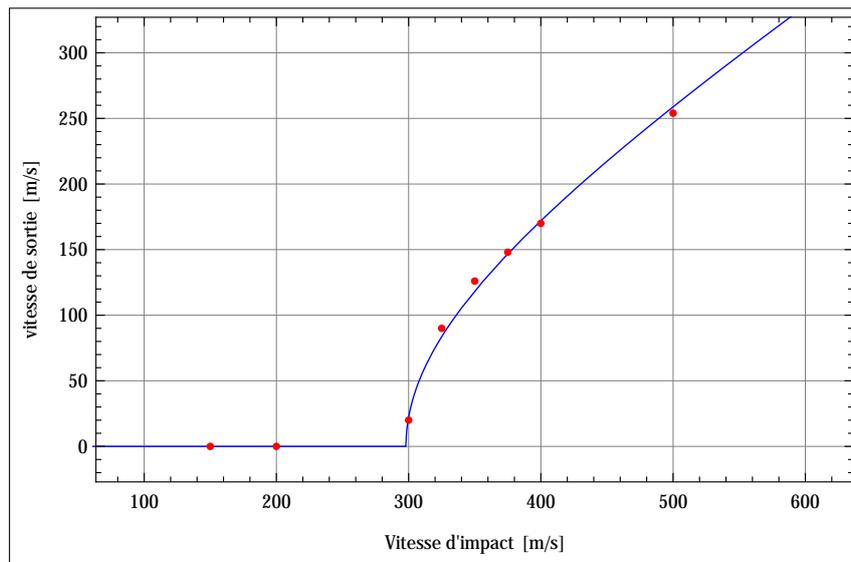


Figure 5 – Impact normal d'un projectile pierreux sphérique de 58 mm de diamètre et de 250 g sur la surface composite de la paroi de la halle : vitesse de sortie du projectile derrière l'obstacle en fonction de la vitesse d'impact. Seuls les projectiles avec une vitesse initiale supérieure à 300 m/s perforent la paroi.

Résistance à l'impact de la paroi de la halle

Cailloux sphériques				Cylindres en acier			
M [g]	v_0 [m/s]	v_{12} [m/s]	Résultat	M [g]	v_0 [m/s]	v_{12} [m/s]	Résultat
100	88	85	OK	100	198	145	OK
250	88	86	OK	250	293	216	OK
500	88	86	OK	500	389	285	limite
1000	88	86	OK	1000	501	369	perforé (70 m/s)

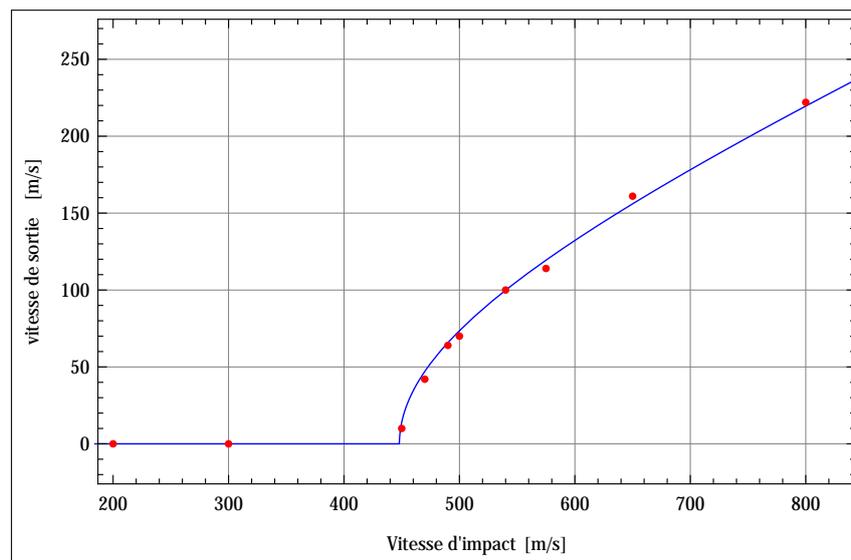


Figure 6 – Impact normal d’un projectile métallique cylindrique de 5 mm d’épaisseur et de 250 g sur la surface composite de la paroi de la halle : vitesse de sortie du projectile derrière l’obstacle en fonction de la vitesse d’impact. Seuls les projectiles avec une vitesse initiale supérieure à 450 m/s perforent la paroi.

A.4 Comparaison des résultats de *Tecova AG* avec ceux du présent travail

Les résultats décrits ci-dessus et ceux de *Tecova AG*, mandatés par la *DIB*, ont été obtenus indépendamment^{||}. Les points suivants résument la comparaison de ces résultats.

Densité des projectiles. *Tecova AG* admet une densité de 1500 kg/m^3 pour les projectiles, ce qui peut correspondre, par exemple, à des métaux légers (Mg) ou des minéraux peu denses (anthracite, charbon, terre). Nous avons admis des densités plus élevées, 2500 kg/m^3 pour des substances minérales (argile, ardoise, béton, marbre, calcaire) et 7830 kg/m^3 pour des projectiles ferreux.

Vitesse initiale des projectiles. Les méthodes de détermination de la vitesse initiale de *Tecova AG* ne sont pas décrites, mais se basent sur (a) la relation de Gurney, (b) l’accélération par réflexion d’une onde de choc dans l’échantillon et (c) sur un bilan d’énergie ; les vitesses initiales obtenues par *Tecova AG* sont comprises entre 110 m/s et 150 m/s. Nos vitesses initiales sont égales à 88 m/s pour les substances minérales, mais supérieures à 198 m/s pour les débris métalliques.

Balistique extérieure. *Tecova AG* ne donne pas la valeur de son coefficient de traînée aérodynamique C_w , ni la forme de son projectile (cylindre à base circulaire ou prismatique ?) En jouant sur la section du corps d’épreuve, nous reproduisons les résultats de balistique de *Tecova Ag* avec $C_w = 1.7$. Le coefficient C_w que nous avons utilisé est plus faible, variant entre 0.1 et 0.44 pour les corps sphériques et égal à 1.17 pour les projectiles cylindriques.

De manière générale, le freinage par l’air des projectiles que nous avons considérés est plus faible que ceux étudiés par *Tecova AG* (densité plus élevée et coefficient de frottement plus faible). Une comparaison des distances de sécurité (limite à 1505 J) est donnée au paragraphe suivant.

^{||} *Berechnung der Flugbahn und Anprallenergie von Trümmer bei einer TNT-Explosion*, Dr. B. Covelli, *Tecova AG*.

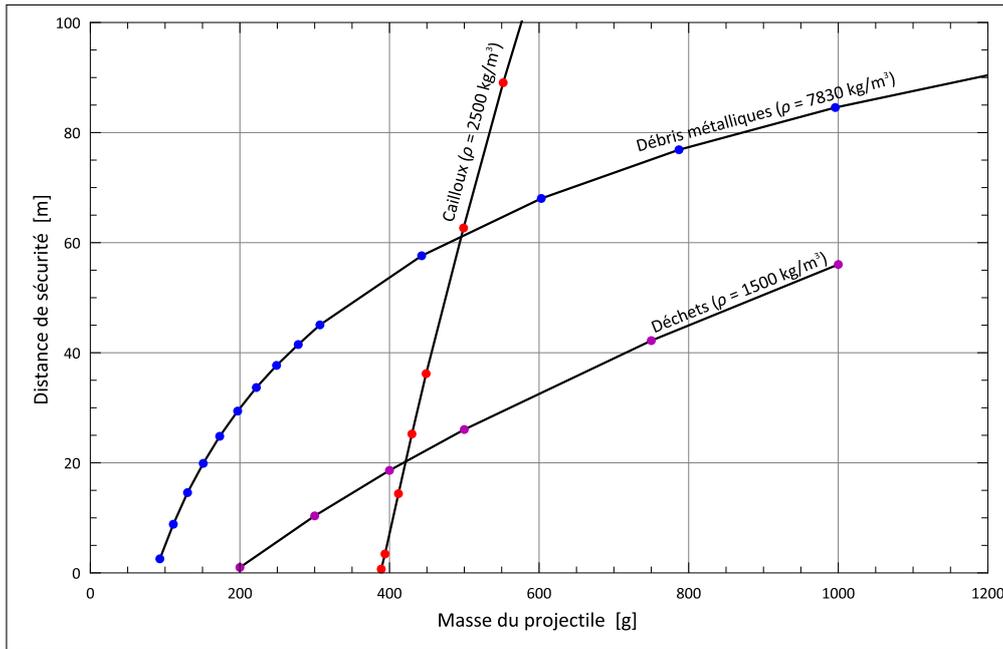


Figure 7 – Distance de sécurité en fonction de la masse du projectile et de son type ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ et $\rho = 7830 \text{ kg/m}^3$ pour les projectiles étudiés dans ce rapport ; $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ pour ceux étudiés par *Tecova AG*).

A.5 Distance de sécurité

La distance de sécurité est définie comme la distance de vol nécessaire pour que l'énergie d'un projectile passe en dessous de 1505 J, correspondant à l'énergie de l'impact auquel le vitrage de la salle de commande résiste. Cette distance dépend de la masse du projectile, de sa densité, de sa section et de son coefficient de traînée aérodynamique (figure 7).

Quelques distances de sécurité typiques sont reportées dans la table suivante.

Distances de sécurité (1505 J)		
Masse [g]	Distance [m]	Type du projectile
100	5	débris métallique
200	30	débris métallique
300	45	débris métallique
400	55	débris métallique
500	65	cailloux

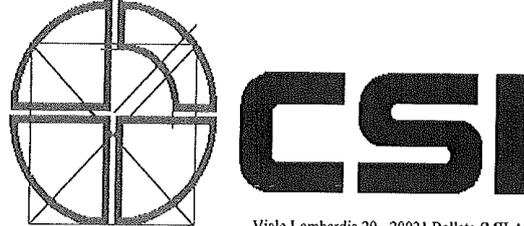
En admettant, par exemple, que des projectiles de 200 g soient hautement probables, il sera nécessaire de prendre des mesures de protection particulières lorsque des travaux d'excavation ont lieu à moins de 30 m des vitres de la salle de commande. On peut envisager des panneaux de bois suffisamment épais ou un grillage de type *Geobrugg* avec des mailles ≤ 40 mm, maintenu quelques centimètres devant la vitre.

B Certificats pour l'impact de balles des vitrages du poste de commande

CPIP		Seite 1 von 1	
 CPD/0497 ¹			
Saint-Gobain Glass Les Miroirs, 92096 La Défense, France 16/3/2011			
EN 14449			
Verbundsicherheitsglas zur Verwendung in Gebäuden und Bauten			
SGG STADIP PROTECT HN432-S L0197009			
<u>Eigenschaften:</u>			
<i>Verhalten für Sicherheit im Brandfall:</i>			
Feuerwiderstand			NPD
Brandverhalten			NPD
Verhalten bei Beanspruchung durch Feuer von außen			NPD
<i>zur Anwendung als beschusshemmende oder sprengwirkungshemmende Verglasung</i>			
Durchschusshemmung			BR4-S
Sprengwirkungshemmung			NPD
<i>Andere Anwendungen, die Risiken für die "Sicherheit in der Anwendung" aufweisen und den entsprechenden Vorschriften unterliegen</i>			
Einbruchhemmung			NPD
Pendelschlagwiderstand			1B1
Beständigkeit gegen plötzliche Temperaturwechsel und Temperaturunterschiede	K		40K
Widerstand gegen Schnee-, Wind-, Dauerlasten bzw. sonstige Lasten	mm		33
<i>zur Anwendung als Schallschutz</i>			
Direkte Luftschalldämmung	dB		NPD
<i>Anwendungen des Wärmeschutzes</i>			
Thermische / Strahlungsphysikalische Eigenschaften:			
Emissivität ϵ_d			0.89
U-Wert	W/(m ² .K)		NPD
Lichttransmission τ_L			0.78
Lichtreflexion ρ_L/ρ'_L			0.07/0.07
Energietransmission τ_E			0.48
Energier reflexion ρ_E/ρ'_E			0.06/0.06
g-Wert			0.60
<u>Gefährliche Inhaltsstoffe:</u>			Nein

NPD : Keine Leistungseigenschaften bestimmt
 1. Identification number of the certification body.

<http://ch.saint-gobain-glass.com/CommonCE/result.asp?type=f&code=L0197009&Da...> 29.03.2011



Viale Lombardia 20 - 20021 Bollate (MILANO) - ITALY
Tel. +39.02.383301 - Fax +39.02.3503940- www.csi-spa.com

Certificato CE di Conformità - Allegato A-18

EC Certificate of Conformity - Annex A-18

Licenziatario/Applicant
SAINT GOBAIN GLASS
SAINT GOBAIN GLASS SOLUTION
60777 Thourotte (France)

La Prova di Tipo Iniziale(ITT) è stata esaminata con l'opzione multi linea/multisite MLC richiesta dal licenziatario
The Initial Type Test (ITT) has been examined according the multi-line/site option MLC requested by the applicant

Prodotto/Product: SGG STADIP PROTECT HN 432-S

La classificazione del vetro stratificato antiproiettile EN 14449:2005 in accordo alla norma di prova EN 1063:1999 è la seguente:
The classification of antibullet laminated glass EN 14449:2005 according the test standard EN 1063:1999 is the following:

Antiproiettile/antibullet classification : BR4 /S

Il presente allegato deve essere accompagnato dal Certificato CE di Conformità rilasciato ai sensi della direttiva CPD 89/106/CEE.
The present annexe must be joint with the EC Certificate of Conformity issued according the CPD Directive 89/106/EEC.

Data aggiornamento/update
30/05/2008

GRUPPO
IMQ

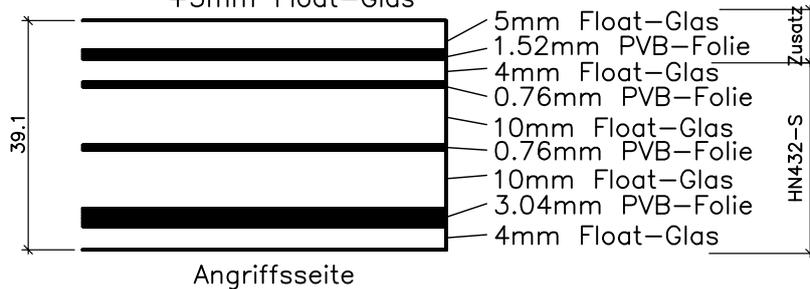
Il Responsabile del Centro
Managing Director
Dott. Ing. P. Cau

P. Cau

L:\Technische_Dienst\Projekte\3603-3699\3603-1_Sonsterung_Sondermülldeponie Bonfol\Kunde\Planung\Feldgebaen\PLANUNG Bonfol S6 Blatt 01a-01a.dwg

Weisglasqualität

KINON
 HN432-S
 BR4 S Mono,
 +1.52PVB
 +5mm Float-Glas



d			
c			
b			
a			
Rev.No.	Änderungsvermerk/Revisions	Datum/Date	Name
Proj.No.	Sondermülldeponie Bonfol Glas Serie S6 Fensterelement		
3603-1			

SÄLZER
 building security

Tel.: +49 (0)6421/938-100
 Fax: +49 (0)6421/938-191
www.saelzer-security.com

Alle Sicherheits-Konstruktionen sind gesetzlich geschützt. Diese Zeichnung ist urheberrechtlich nach §19 u. 19 des Gesetzes gegen den unlauteren Wettbewerb geschützt. Eine widerrechtliche Nutzung wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. All security constructions and designs are protected by patent law. Copying or disclosure to unauthorized persons is forbidden. Violations of these laws will result in criminal prosecution.

Widerstand gegen/Resistance against:	
Einbruch/Forced entry:	--
Durchschuss/Ballistic:	--
Sprenghwirkung/Blast:	--
Sonstiges/Others:	--
Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1	
Oberfläche/Surface:	--
Gezeichnet/Drawn by:	06.12.2010
Blattformat/Paper size:	See
Maßstab/Scale	Blatt/Sheet No.
1:1	G01

