

Auscultation d'une paroi clouée à Önzberg

Daniela Heitz, Arno Thut
Solexperts AG, Schwerzenbach, Schweiz



Leonhard Schmid
smh Tunnelbau AG, Rapperswil, Schweiz

MOTS CLES : Techniques de surveillance, paroi clouée, micromètre de forage, inclinomètre

RESUME : Grâce à la surveillance géotechnique de la paroi clouée d'une fouille de 15 m de haut, les déformations peuvent être contrôlées et les mesures de sécurité sont localement adaptées à la tenue des terrains.

ABSTRACT : By monitoring a nailed soil excavation wall of up to 15 m height the deformations could be checked and appropriate additional safety measures regarding the local ground conditions could be applied.

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet Train 2000, une nouvelle connexion de 45 km doit être construite dans la région de Herogenbuchsee entre Mattstetten et Rothrist (Fig 1.). Elle permettra une réduction de 15 minutes sur le trajet Zürich – Bern, avec une vitesse de circulation de 200 km/h.

Dans la région très peuplée de Suisse Centrale, un intérêt particulier est porté à la limitation du bruit, l'objectif étant d'enterrer un tiers de la ligne d'ici à 20 ans.

Le tunnel de Önzberg constitue une partie de la ramification de Wanzwil, laquelle relie la nouvelle ligne à double voie et sans croisement à l'ancienne ligne à voie unique en direction de Solothurn. Un tiers de la section ouest du tunnel de Önzberg est construite à ciel ouvert, tandis que le reste est creusé au tunnelier. La section à ciel ouvert comprend une fouille de 8.0 à 14.0 m de profondeur sur 800 m de long. La stabilité est assurée par une paroi clouée, excepté au niveau de la tête de tunnel, où une paroi de pieux est réalisée. La pente de la paroi varie de 5 :1 au sud à 10 :1 au nord.

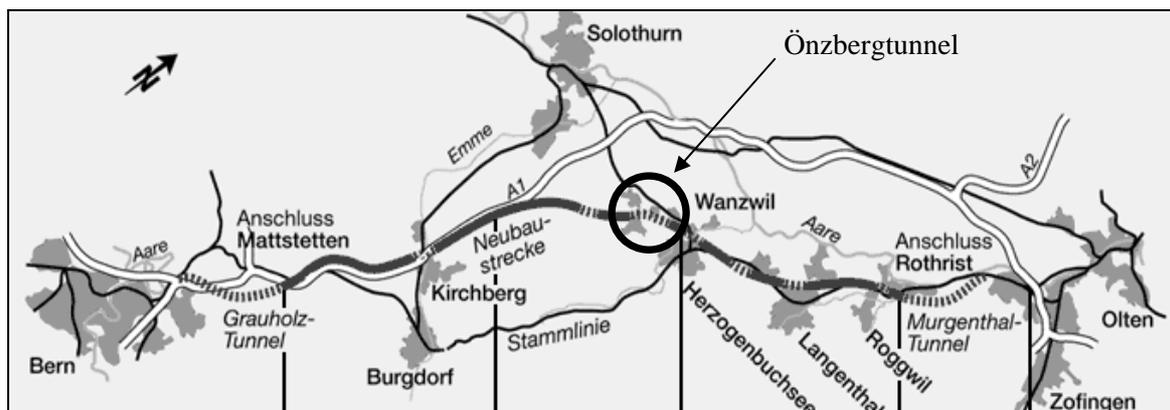


Figure 1. Vue d'ensemble de la nouvelle section Mattstetten - Rothrist

2 PROFIL GEOLOGIQUE DE LA FOUILLE

Sur la coupe d'excavation (Fig. 2), on remarque, au-dessus de la « Molasse inférieure de Süswasser », composée de sable –silt- argile, un dépôt morainique d'une épaisseur variable de 8.0 à 14.0 m.

La couche supérieure, d'une épaisseur de 2.2 à 2.8 m (y compris terre végétale ~ 0.3 m) est fortement érodée.

Cette couche supérieure érodée est une formation de sable fin, faiblement à fortement silteux (CM, SM) avec peu de graviers, dans la classification In situ Bodenbildung. La densité varie de meuble à moyennement dense. Dans les forages SB1 et SB2, des valeurs de SPT de $N_{30} = 7$ et 27 ont été mesurées.

Le niveau morainique se compose en majeure partie de sable fin et moyen faiblement cohésif, avec du gravier moyen, et on trouve localement des zones d'argiles. La fraction argileuse est au maximum de 15 %. Les graviers trouvés sous forme de lentille ont une taille de 10 à 60 mm. Les forages ont recoupé occasionnellement des rochers et des blocs d'un diamètre maximal de 20 cm.

Les mesures de SPT ont donné des valeurs de densité variables pour le niveau morainique. Les 4 mètres supérieurs sont meubles ($N_{30} = 4$ à 9). En règle générale, la densité augmente avec la profondeur, de moyennement dense ($N_{30} = 16$ à 33) à fortement dense, jusqu'à très dense ($N_{30} = 39$ à 182). Dans la zone est de la fouille se trouvent également des niveaux moyennement denses ($N_{30} = 14$ à 29) jusqu'au socle.

Dans le forage SB1, des essais œdométriques menés sur des échantillons ont donné, pour la profondeur 4.5 m, une valeur de module œdométrique de 14.4 MN/m^2 , et à la cote 7.2 m une valeur de 21.1 MN/m^2 . Le module de déformation varie de manière identique à la densité et les valeurs obtenues doivent être considérées comme des valeurs minimales.

La perméabilité atteint 10^{-7} à 10^{-8} m/sec pour les graviers fins et grossiers et $3 \cdot 10^{-5}$ à 10^{-6} m/sec dans les niveaux sableux.

Le niveau piézométrique montre des cotes variables et atteint dans la moraine le niveau érodé.

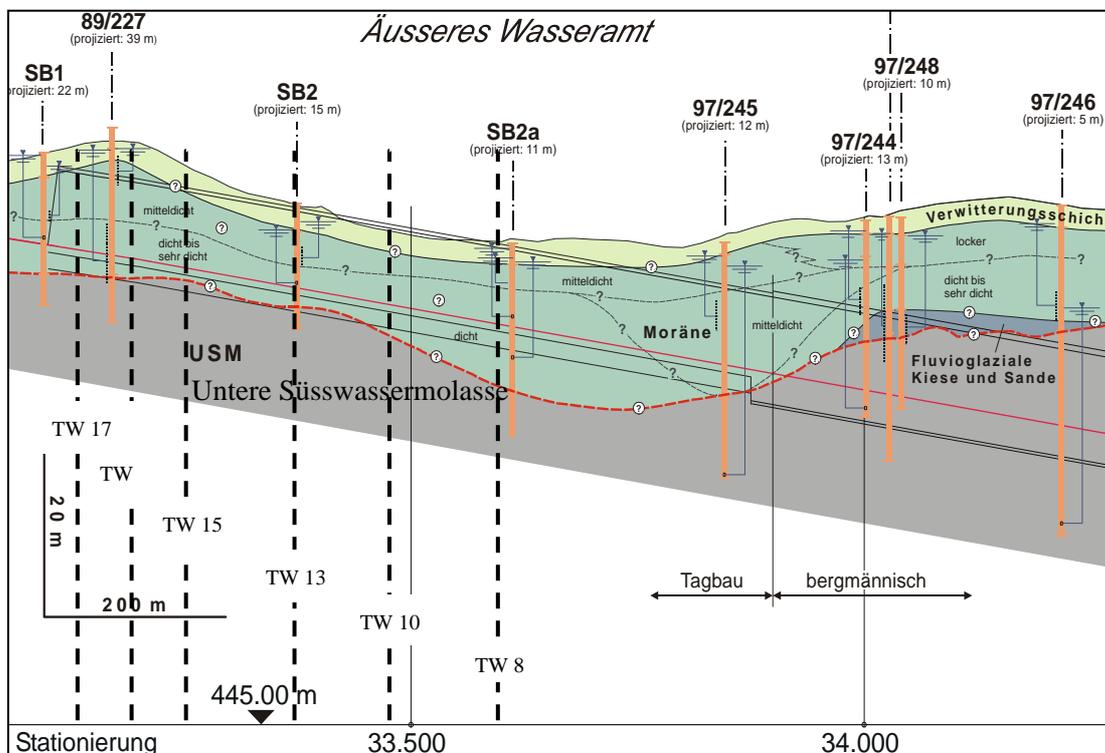


Figure 2. Coupe de la fouille dans la zone excavée à ciel ouvert.

3 OPERATIONS D'EXCAVATION

Du fait des caractéristiques géotechniques et des contraintes techniques, il a été décidé de mettre en œuvre une paroi clouée avec drainage.

Tableau 1	Clous et drainage
Clous	Longueur 8-10 m Diamètre 20 mm Inclinaison 6° Espacement horizontal 1.40 m Espacement vertical 1.50 m Tension maximale 56 kN Diamètre forage 114 mm
Drainage	Longueur 12 m Placé comme les clous

Sur 40 m dans la zone ouest, des déformations importantes ont été mesurées avec un théodolite au début des travaux, qui ne se sont pas stabilisées par la suite. Dans cette zone, le pied du talus a été renforcé avec des ancrages de 40 mm GEWI (micropieux) ainsi qu'avec des ancrages précontraints à une tension de 200 kN.

4 SURVEILLANCE DE LA FOUILLE

Dans le cas de travaux géotechniques (fouilles profondes, barrages, pieux, tunnels, etc...) pour lesquels des informations discontinues sont obtenues par forages, et en particulier dans des terrains morainiques, il est important de vérifier les charges et les déformations prévues. Les mesures géotechniques constituent un élément important du suivi de la sécurité et permettent d'adapter les méthodes de chantier en conséquence.

Comme mentionné précédemment, ce chantier présentait en début de travaux des risques géotechniques :

- Ecaillage et rupture allant jusqu'au glissement de terrain au front de la paroi clouée ;
- Instabilité locale du fond de fouille ;
- Glissement potentiel des blocs armés de clous ;
- Mauvaise cohésion locale du béton projeté et des terrains meubles.



Fig. 3



Fig. 4

Figure 3. Eboulement du béton projeté dû à une mauvaise cohésion avec les terrains meubles

Figure 4. Renforcement local de la paroi clouée avec des ancrages précontraints

Suite à l'observation de ces risques géotechniques, le programme d'auscultation prévu (jauges de déformation espacées de 1 m sur les clous, inclinomètre et piézomètre) a été renforcé avec :

- au nord et au sud, un tube déformètre / inclinomètre de 18 à 19 m de long, incliné de 15° par rapport à la verticale ;
- au nord et au sud, selon la hauteur de la paroi, de un à deux tubes déformètre /inclinomètre de 16 à 19 m de long, incliné de 6° vers le bas par rapport à l'horizontale ;
- mesures de déformation sur clous avec micromètre de forage.

Grâce à ces mesures complémentaires, les déformations du soutènement et des terrains meubles pouvaient être évaluées.

5 RESULTATS DES MESURES

Les déformations totales observées au sommet du mur (ligne de mesure sub-verticale S1, N1) et à une profondeur de 4.0 m (ligne de mesure sub-horizontale S2, N2) sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Önzberg : déplacements dans la paroi clouée en mm

MQ	S1/h	S1/v	S2/h	S2/v	N1/h	N1/v	N2/h (N3/h)	N2/v (N3/v)
TW8	118	79	32	45	107	58	130	115
TW10	Tube perforé, mesure impossible				103	73	40	58
TW13	42	21	19	35	102	73	41	40
TW15	96	55	-	20	77	39	41	40
TW16	-	-	-	-	-	-	21 (34)	16 (16)
TW17	66	44	28	55	33	23	-	-

Dans la section de mesure du côté nord, les mesures de déplacement sur la paroi du mur à une profondeur de 4.0 m sont du même ordre de grandeur qu'au sommet du mur. Ceci implique que les déplacements principaux se situent dans la partie inférieure du mur.

Dans la section de mesure située au sud, les déplacements sont répartis plus uniformément. Les mesures géodétiques sur la paroi du mur confirment les mesures de déplacement, mais sont plus importantes et atteignent 200 mm. Une explication est la mauvaise cohésion locale entre le béton projeté et les terrains meubles.

Les différents comportements du massif de sol conforté, jouant le rôle de mur de soutènement, sont dus à l'inclinaison de la paroi (10 : 1 au nord, 5 : 1 au sud).

Les déplacements sous le mur, obtenus par les forages sub-verticaux, sont faibles, de l'ordre de 1 à 2 mm. A noter une exception dans la section TW10 au sud, avec des déplacements horizontaux supérieurs à 25 mm et des déplacements verticaux supérieurs à 5 mm. Autre exception dans la section TW 18 au nord : déplacements horizontaux de 18 mm et déplacements verticaux de 21 mm, s'étendant au-delà des clous, et significatifs d'une instabilité qui a été traitée en soutenant la paroi avec des pieux de GEWI (Figure 11).

Derrière le mur de soutènement, dans la zone de transition entre clous et sol, les déplacements horizontaux atteignent 8 à 25 mm et les tassements verticaux de 0 à 20 mm.

Le figure 5 présente les déplacements différentiels mètre par mètre, et la figure 6 présente l'intégration des valeurs. La figure 7 donne les vecteurs de déplacements différentiels dans les deux forages sub-horizontaux N2 et N3 de la section de mesure TW16 nord.

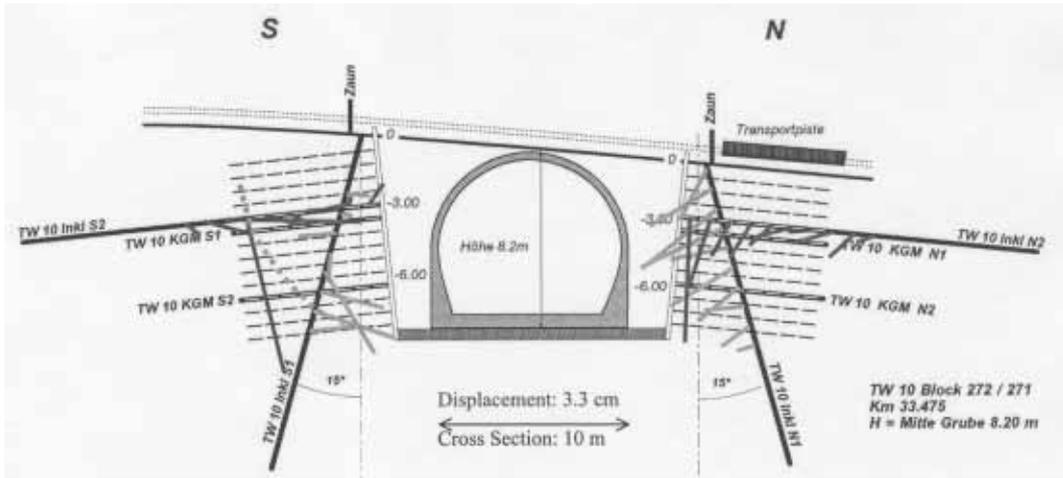


Figure 5. TW10 : Déplacements différentiels des mesures combinées Déformètre de forage / inclinomètre.

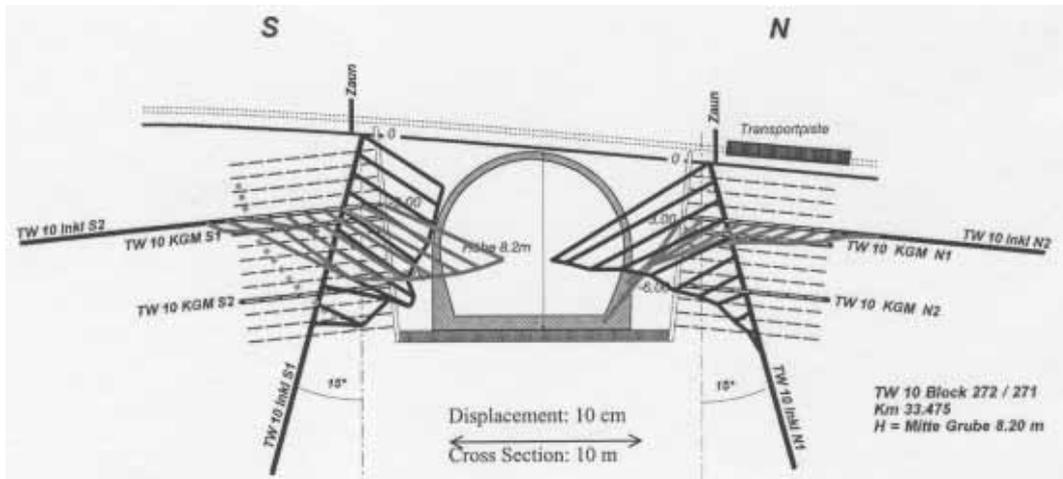


Figure 6. TW10 : Déplacements intégrés des mesures combinées Déformètre de forage / inclinomètre.

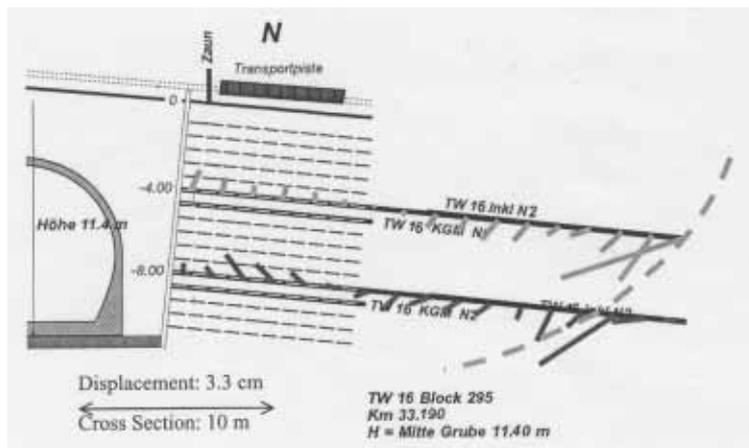


Figure 7. TW 16 : Déplacements verticaux différentiels du côté nord

5.1 Mesures de déplacement dans le sol et les têtes de clous

TW 10 Sud : Les déplacements différentiels les plus importants (Figure 5) sont localisés dans le tube de mesure horizontal S2, à 6.5 m par rapport à la paroi clouée et dans le tube de mesure vertical S1, à une profondeur de 7.0 m depuis le haut de l'excavation, soit à 4.5 m depuis le mur cloué. Dans cette zone, une surface de glissement est possible, et les clous KGM S1 et KGM S2 ont été mis en tension.

Sur la figure 6, on observe clairement que les déplacements principaux se situent dans une zone précise et que le reste du sol est relativement stable.

TW 10 Nord : Les mesures pour N1 et N2 montrent des images complètement différentes (Figures 5 et 6). Le vecteur de déformation différentiel, pour les deux lignes de mesure N1 et N2 est distribué de manière relativement uniforme sur toute la zone clouée. On mesure un basculement de la fouille, avec une valeur maximale de 107 mm. Dans la direction de la paroi du mur, les déplacements augmentent et indiquent une tendance au développement d'un glissement, comme observé dans la zone de la paroi.

TW16 Nord : Sur la base des vecteurs de déformations différentielles (Figure 7) des deux forages sub-horizontaux, il pourrait exister une zone de rupture potentielle à 10 m derrière les clous. Dans la zone de confortement du sol, le vecteur est dirigé vers le haut, indiquant une légère rotation du mur.

5.2 Mesures de contrainte dans les clous

Les tensions mesurées dans les clous varient entre 50 et 80 kN, bien que pour le clou TW10 KGM S2 (Figure 8) une valeur de 200 kN ait été observée. Ceci peut être dû à une erreur de mesure, car la limite d'élasticité de 500 N/mm^2 a été dépassée. Par ailleurs, d'autres clous n'ont pas été mis en tension et ne reprennent aucune charge (TW10 N2, pas de figure). Les deux techniques de mesure (capteurs de déformation, Figure 8 et micromètre de forage compact, Figure 9) donnent une distribution similaire, avec une tension croissante en s'éloignant de la paroi clouée.

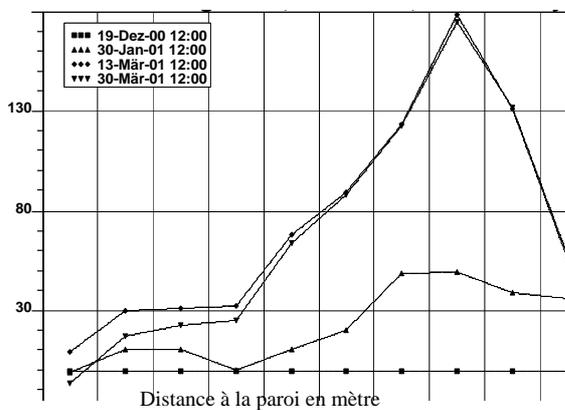


Figure 8. Mesures de la contrainte dans les clous avec des capteurs de déformation

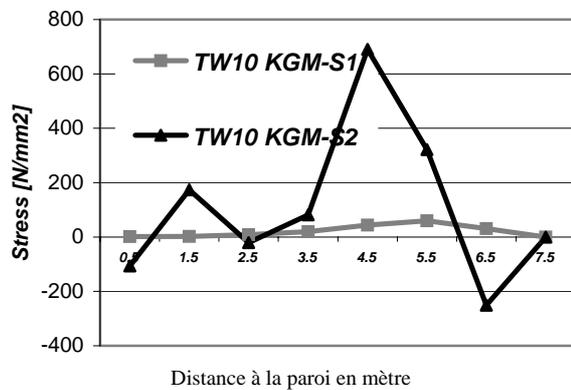


Figure 9. Déformation dans les clous convertie en contrainte pour TW10 KGM S1 et S2

Le contrôle visuel montre que les clous effectuent un déplacement important, jusqu'à 100 m pour la tête des clous. Les forces de friction ont été par conséquent complètement réalisées.

La somme des déformations observées au niveau de KGM S1 atteint 3 mm, et 5 mm au niveau de KGM S2.

5.3 Tests de chargement

Des tests de chargement ont été conduits sur plusieurs clous. Le chargement initial était de 14 kN, puis les clous ont été chargés à 56 kN, 98 kN et 140 kN, avec une mesure simultanée des déformations pour chaque palier de chargement, sur une période de 15 à 30 minutes. Certains clous présentent un écrouissage, pour le dernier palier de chargement.

Tableau 2. Test de chargement : tension – tension initiale = 126 kN

Clou No.	Position depuis le haut de l'excavation [m]	Longueur clou [m]	Déformation permanente [mm]	Déformation élastique [mm]
1	-3.40	10	2.31	6.68
7	-3.40	6	8.68	5.02
35N	-3.00	10	13.10	9.18

6 INTERPRETATIONS ET MESURES MISES EN OEUVRE

La tension dans les clous ne peut apparaître que lorsque le sol se déforme, dans le cas où les clous ne sont pas précontraints. Les déplacements mesurés en tête de clous furent parfois deux fois supérieurs à ceux prévus par la modélisation (4.5 cm).

Sur la base des mesures de contrainte sur les clous et des mesures de déformation du massif, qui n'indiquent aucun développement de zone de rupture (excepté TW 16), on peut conclure que la résistance et la longueur des clous étaient suffisantes.

Les déplacements importants dans le corps de terrain conforté sont dus aux caractéristiques géotechniques avec, localement, une faible densité et une compressibilité trop élevée, ainsi qu'une pente trop forte du mur (ceci conduit à des tensions normales fortes).

Du côté nord, les tassements du mur de fouille sont dus à la pente trop importante du mur et, en partie, au poids propre du béton projeté et au manque de cohésion entre le béton projeté et le terrain meuble. Dans la partie inférieure de la fouille, le béton en place a tendance à s'abaisser.

Le comportement de la paroi clouée a pu être amélioré et des glissements potentiels dans certaines zones critiques ont pu être évités en faisant supporter le poids du mur par des micropieux dans la partie inférieure de la fouille (Figures 10 et 11).



Figure 10. Mise en place d'un micropieu

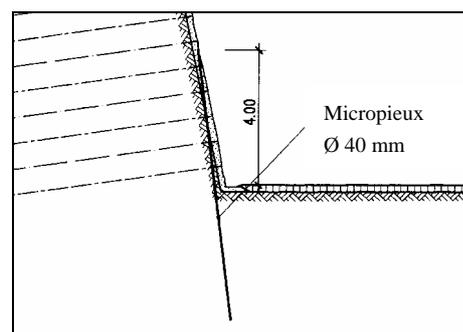


Figure 11. Implantation des micropieux

REFERENCES

<http://www.sbb.ch/bahn2000/> Schweizerische Bundesbahnen SBB
<http://www.mbn.ch/oenzberg.htm> Matousek, Baumann & Niggli AG:
Ingenieurgemeinschaft AQUIPA. Nagelwand west. Statische Berechnungen
Ingenieurgemeinschaft AQUIPA. Lenkungsplan