

# Cálculos estáticos e hidráulicos de técnicas de Ingeniería biológica

La Ingeniería Biológica es una disciplina muy antigua que nace de la necesidad de defender a la población de las inundaciones provocadas por las crecidas de los ríos y de los desprendimientos en laderas inestables. Las primeras intervenciones se conocen desde la época romana, que empleaban árboles enteros como protección frente a la erosión fluvial.

En el pasado siglo, muchas técnicas fueron sustituidas por el hormigón. Ahora la ingeniería biológica resurge de nuevo debido a diversas causas, entre otras:

- La ventaja que supone la utilización de materiales como las plantas y la madera con la ejecución estable y fácil mediante nuevos medios mecánicos.
- La segunda ventaja es una integración óptima entre el paisaje y la combinación de eficacia estabilizadora con eficacia ecológica.
- La tercera ventaja es la existencia de los primeros cálculos hidráulicos y estáticos, que hacen que la ejecución de las obras y la gestión de la vegetación sean más seguras.

En el siguiente artículo, se presentan los efectos de las plantas para la estabilización de las laderas inestables y el comportamiento de las plantas leñosas en las márgenes de los ríos con nuevos cálculos hidráulicos.



## Florin Florineth

Profesor del Instituto de Ingeniería Biológica y Construcción del Paisaje de la Universidad de, Bodenkultur, de Vienna.

Fue alumno aventajado del prof Dott. Hugo Shiechteln con quien colaboró en numerosos proyectos y ha trabajado durante veinte años como responsable del área forestal y mediambiental de la región del Alto Adige en Italia.

Cuenta con numerosos trabajos de restauración tanto en alta montaña como en ámbito fluvial tanto en Europa como en otros países como Brasil o Nepal y es autor de numerosas, entre las últimas "Pflanzen statt Beton.



*Río Vienna Canalizado*



*Rehabilitación del tramo anterior tras un año*

### Efecto de las plantas leñosas en la estabilización de laderas inestables

En muchas obras, bastaba o basta todavía la experiencia de la eficacia de las plantas en la consolidación de laderas inestables y de laderas fluviales. En el ámbito de las autopistas, carreteras estatales y provinciales y en las vías férreas, se requieren cálculos estáticos para garantizar una estabilidad suficiente.

Comparando entre el hormigón armado y la inserción de material vivo en la estructura, el cálculo estático no resulta fácil. Se calculan las varas y las plantas enraizadas como si fueran materiales muertos con una persistencia a largo plazo. Hasta la fecha no es posible calcular el efecto del aumento de la capacidad estabilizadora mediante el crecimiento de las raíces. Sin embargo lo que sí se puede calcular es el efecto drenante mediante la transpiración. De acuerdo con la fórmula de SELBY (1993), la resistencia al corte depende de la cohesión, de la tensión normal, de la presión del agua y del ángulo de rozamiento.

La estabilidad de una pendiente, tanto de la margen del río como de un talud, depende de:

- La geometría
- Calidad del fondo: densidad, cohesión, ángulo de rozamiento
- Carga
- Vegetación

Los efectos de la vegetación son dos:

- Efecto mecánico
- Efecto drenante

El efecto mecánico, que estabiliza el terreno mediante las raíces o estacas enterradas, depende de:

- La resistencia a la compresión y a la rotura. Varas o estacas fuertes de sauce demuestran tener esta resistencia.
- Resistencia a la tracción y a la rotura. Especies frondosas enraizadas de pequeño diámetro presentan esta resistencia.

### Cálculos estáticos para estabilizar los entramados vivos

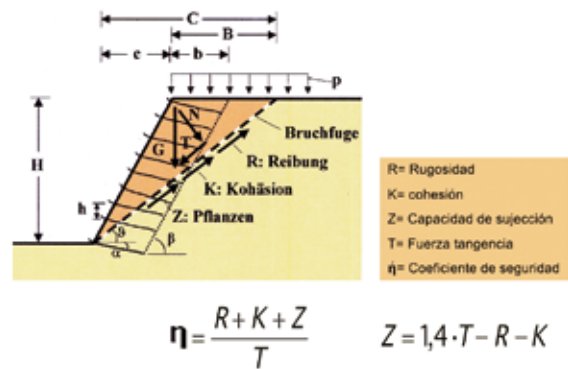
De acuerdo con Shuppener (2003), el fallo de la vegetación puede tener lugar con la rotura de las plantas o con la de las mismas. Por tanto resulta muy importante, utilizar plantas que pueden asumir una gran compresión o resistencia a la ruptura y que tengan las raíces fuertes de manera que impidan el desarraigo.

El modelo de Bernard Shuppener demuestra que la resistencia al corte depende de la calidad y densidad del terreno y sobretodo de la edad y crecimiento de las raíces.

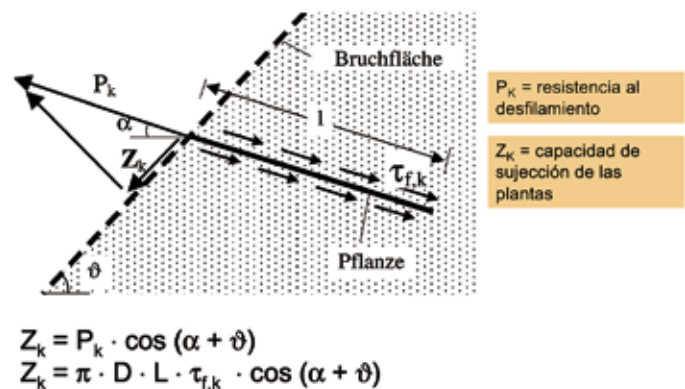
La calidad estabilizadora de una planta se puede calcular por medio de la capacidad de que se compone de la resistencia a y del ángulo de inserción de las plantas con la línea de deslizamiento y la ladera (figuras 1 y 2).

Bernard SHUPPENER calcula solo los factores mecánicos de las plantas, los factores biológicos debido a la transpiración no están incluidos. Estos factores se incluyen por primera vez por Rolf Katzenbach, citado en el capítulo siguiente.

**Figura 1:** Estabilización de una ladera inestable. Efecto de la vegetación



**Figura 2:** Capacidad de sujeción de las plantas (Schuppener 2003)



### La estabilidad de un margen ferroviario vegetado

El director del Instituto de Geotécnica del Politécnico de Darmstadt, Alemania, Prof. Rolf Katzenbach ha controlado la estabilidad de un margen ferroviario de 100 años.

El margen está compuesto por arena sin material arcilloso y por tanto sin cohesión. La estabilidad calculada era de 0,77 casi la mitad de la estabilidad requerida.

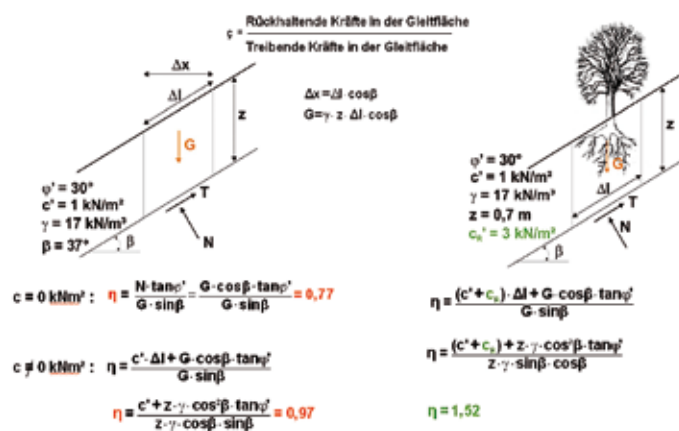
El margen fue revegetado con arbustos y árboles y actualmente es estable, sin haber sufrido ningún tipo de alteración. Resulta evidente que la causa de estabilización pueden ser solo las plantas. El efecto de las plantas es mecánico y biológico. Rolf Katzenbach calculaba el efecto biológico de la transpiración y por tanto el efecto drenante del terreno. Mediante tensiómetros se comprobaba un elevado drenaje del terreno, que aumentaba la cohesión de 0 hasta 3-5 kN/M<sup>2</sup>.

También el ángulo de rozamiento del material utilizado se aumentaba con las plantas desde 30 a 34-35 Calculando solo la cohesión de 3 k.o. /m<sup>2</sup> la estabilidad de la margen ferroviaria vegetada tiene un valor de 1, 52 suficiente por tanto para el uso del transporte ferroviario Con estas investigaciones el Prof. KRATZENBACH ha demostrado que se puede también calcular el efecto biológico de las plantas en la estabilización de los taludes y laderas.

**Figura 3:** Duplicación de la estabilidad del talud gracias al efecto de la vegetación



**Reconstrucción de la ladera con Enrejado vivo, Alto Adige Italia**



### Comportamiento de plantas leñosas en ríos y cálculos hidráulicos de riberas revegetadas

La vegetación de ribera está formada por una gran diversidad de plantas que presentan diferentes formas del aparato aéreo, con una diferente rugosidad de las ramas y de las hojas, con un diámetro diferente del tronco etc. Esta diversidad causa también un comportamiento diferente durante una crecida.

Aunque soy consciente de que se trata de una simplificación, he subdividido la vegetación leñosa en tres categorías.

#### Vegetación elástica

La vegetación elástica, flexible es sumergida y se pliega hacia la crecida durante las crecidas y protege así el suelo contra la erosión La velocidad del agua, la sección del refluo y el caudal se disminuyen solo ligeramente.

La elasticidad depende sobretodo del diámetro del tronco, que según nuestras investigaciones no debe superar los 40 cm.

La estación influye sobre la flexibilidad Durante el periodo vegetativo, las plantas leñosas aparecen más lisas y densas y se pliegan más rápidamente que en invierno.

La vegetación elástica es una vegetación joven, que deriva de un rejuvenecimiento mediante la poda a ras o bien por un método de ingeniería biología que crea un crecimiento muy denso y sutil, como la estera de ramaje o la fajinas.

#### Vegetación rígida y densa

La vegetación rígida y densa reduce mucho la velocidad del agua, que al ralentizar no crea daños a las orillas la velocidad reducida y la sección limitada disminuyen el deflujo del agua y pueden causar inundaciones de las áreas adyacentes dependiendo de la anchura del cauce y del nivel hídrico Esta vegetación está formada por árboles y arbustos con una ramificación baja. La forma de esta vegetación es el resultado del desarrollo natural, sin intervención de mantenimiento ni gestión, y tiene un gran valor ecológico.

#### Árboles rígidos y aislados

Los árboles aislados con un tronco fuerte y sin ramas en la parte baja, desvían el agua con gran velocidad y crean turbulencias, que dependiendo de la forma y profundidad de las raíces, pueden llegar a desarraigar el árbol, causando no solo una fuerte erosión en la orilla, sino también bloqueos sucesivos en tramos estrechos, como por ejemplo debajo de un puente, debido a los árboles transportados por el agua Estos fenómenos pueden estar causados también por troncos rígidos, rotos con la fuerza de la corriente.

Arboles rígidos y singulares son el resultado de una gestión equivocada, al creer que se abre la sección para el deflujo del agua y que ofrecen una suficiente función ecológica. Los árboles rígidos y aislados derivan también del desarrollo de plantas alóctonas como la robinia que se expanden, ahogando a la vegetación adyacente.

El único método para eliminar las robinias es el cortar la corteza en todo el tronco con una altura de 50 cm. durante el periodo vegetativo (especialmente los meses de abril y mayo) para dejar morir a la planta, que es extirpada del terreno tras un año. El corte al pie, en cambio, favorece el desarrollo de nuevos brotes que con mayor fuerza pueden sofocar la vegetación circundante.

#### Solo dos tipos de especies leñosas ofrecen una función protectora como vegetación de ribera

- Plantas elásticas y flexibles
- Plantas rígidas y densas

### Cálculos hidráulicos para cursos de agua con riberas vegetadas

Los cálculos más simples de la velocidad del agua se realizan con la fórmula de STRICKLER (1923).

$$V_m = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

- V** = Velocidad media
- k<sub>St</sub>** = Coeficiente de rugosidad
- R** = Radio hidráulico = A/U Area de la sección /perímetro mojado
- I** = nivel hídrico

Resulta importante el coeficiente de rugosidad, que según la calidad y forma de las plantas se define de la siguiente manera:

- Plantas leñosas flexibles y sumergidas  
25-30 (INDLEKOFER 2003)
- Plantas leñosas flexibles y en gran parte sumergidas  
16-20 (RAUCH 2006)
- Plantas rígidas y densas  
3-4 (INDLEKOFER 2003)
- Prado sumergido de gramíneas y herbáceas  
30-40 (STRICKLER 1923)

Los nuevos cálculos hidráulicos utilizan la fórmula de DARCY WEISBACH (RAUCH 2006) para el cálculo de la velocidad del agua.

$$V_m = \left( \frac{8 \cdot g}{\lambda} \right) \cdot R^{1/2} \cdot J^{1/2}$$

- λ** = Coeficiente de resistencia
- g** = aceleración de la gravedad

El coeficiente de resistencia (λ) se calcula de diversas maneras según los autores.

$$\lambda V = \lambda P + S_o$$

- S<sub>o</sub>** = Lecho
- P** = Pianta

$$\lambda_p = \frac{4 \cdot h_p \cdot d_p \cdot \cos\alpha}{a_x \cdot a_y} \cdot C_p$$

$$= \frac{4 \cdot A_p \cdot \cos\alpha}{a_x \cdot a_y} \cdot C_p$$

- h<sub>p</sub>** [m] Altura de las plantas
- d<sub>p</sub>** [m] Diámetro de las plantas
- a<sub>x</sub>** [m] Distancia de la planta en la dirección del flujo
- a<sub>y</sub>** [m] Distancia de las plantas a 90° del flujo
- a** [Grad] Inclinación del talud
- a** [-] Coeficiente de la planta aislada
- AP** [m<sup>2</sup>] Superficie de la planta mojada

De acuerdo con las investigaciones de mi colaborador Anís Meter RAUCH (2006) en el tramo experimental del río Viena la fórmula de MERTENS está más cercano a los procesos hidráulicos naturales.

Hans Peter RAUCH (2006) ha modificado la fórmula de MERTENS, tomando la altura de las plantas sumergidas y no la de las plantas erectas: los resultados de las plantas sumergidas son mucho más bajos en comparación con las plantas erectas de acuerdo con la fórmula de MERTENS.

Los nuevos cálculos de RAUCH demuestran que las plantas leñosas y flexibles dejan pasar gran cantidad de agua, disminuyendo poco la velocidad y el flujo y ofreciendo una protección óptima del suelo al doblarse sobre la margen.

Fecha	Alter d. Vegetales [Veg. per.]	kT [m]	λP (Mertens) [-]	λ (Modificada) [-]
12.8.02	5	0,31	0,647	0,217
4.7.01	4	0,29	0,687	0,165
22.9.99	2	0,27	0,928	0,148
4.7.02	5	0,32	0,705	0,120
6.3.02	4	0,29	0,897	0,130
3.10.01	4	0,29	0,897	0,220
13.8.02	5	0,33	0,705	0,226
13.8.02	5	0,33	0,705	0,282

### Conclusiones

La ingeniería Biológica ha dado algunos pasos en adelante. Existe la posibilidad de calcular la estabilidad de los entramados vivos (Richard HIRT 1990) de los lechos de ramaje (Bernard SHUPPENER 1994) y en general el efecto biológico del drenaje del terreno.

El efecto estabilizador de las intervenciones sobre laderas inestables, depende tanto de la calidad del proyecto como de la construcción, que debe ser respetada lo máximo posible.

Esto vale también para las intervenciones sobre cursos de agua. Además de la importancia de la elección de las técnicas (obras longitudinales o transversales, lisas o rugosas, superficiales -lineales-puntuales- verticales-oblicuas) debe prestar la mayor atención a la elección de las plantas (árboles o arbustos) y a las intervenciones de mantenimiento que dependen sobre todo de las planas y técnicas señaladas. La planta adecuada en el sitio adecuado y la calidad de la obra permiten ahorrar mucho dinero.