

Składnik pierwszy występuje stale ze znakiem minus. Ponieważ we wzorze powyższym uwzględnione zostały już odpowiednie znaki, więc rzeczywiste naprężenia na krawędziach filara otrzymamy sumując naprężenia  $\sigma_{1,2}$  oraz  $\sigma_{s1,2}$ :

$$(\sigma_1 + \sigma_{s1}) \quad \text{ i } \quad (\sigma_2 + \sigma_{s2})$$

$\sigma_s$  musi być wzięte z takim znakiem, jaki wypada z wyżej podanego wzoru.

### Wpływ ciężaru własnego sklepień.

Na filar działa tylko składowa normalna  $G_{1N}$  ciężaru sklepienia  $G_1$  /rys.53/, składowa skierowana prostopadle do linii wezglowi. Ściśle rzecz biorąc, na filar przenoszą się dwie reakcje od ciężaru własnego sąsiednich sklepień, każda o wartości  $\frac{1}{2} G_{1N}$  a więc razem  $G_{1N}$ .

Na rys.53 przedstawiono sklepienie sięgające ponad zwierciadło wody, a więc inaczej niż to miało miejsce np. na rys.50. Formę taką przyjęto dla uproszczenia rachunku; zresztą w rzeczywistości często sklepienie w ten lub podobny sposób wyprowadzone jest ponad wodę.

Najniższa część sklepienia /poniżej przekro-

ju, w którym grubość łuku wynosi  $d_1$ , /nie brana jest pod uwagę, gdyż jej ciężar nie oddziaływa na filar.

Objętość sklepienia zawartego między przekrojem górnym /o grubości łuku  $d_2$  / a dolnym /gdzie grubość łuku wynosi  $d_1$  / wyznacza się wzorem Guldina dla brył obrotowych. Zwrócić należy jednak uwagę na następującą okoliczność. Oś obrotu sklepienia jest miejscem geometrycznym środków wszystkich łuków, a ponieważ przy trapezowym przekroju poprzecznym /pionowym/ filarów na ogół łuki mogą mieć rozmaite kąty środkowe i rozpiętości w różnych głębokościach, więc oś obrotu niezawsze będzie linią prostą i w konsekwencji sklepienie nie będzie bryłą obrotową. Można wszakże pominąć tę okoliczność, gdyż jej uwzględnienie zagmatwałoby tylko rachunek, dając co prawda w rezultacie wzory dokładniejsze, lecz ich znaczenie praktyczne nie byłoby wcale większe od wzorów uproszczonych, wygodniejszych w użyciu i wskazujących z dostateczną pewnością, czy obliczone naprężenia zawarte są w granicach dopuszczalnych.

Przed przystąpieniem do obliczenia objętości

sklepienia należy ustalić położenie osi obrotu, które zależy od tego, czy grubość sklepienia zwiększa się ku środkowi, czy na zewnątrz, czy też w jaki inny sposób. W wywodach poniższych dla prostoty przyjęto, że grubość łuków zwiększa się w stronę środka, że zatem zewnętrzna powierzchnia sklepienia jest cylindryczna, a przy tym o stałym kącie środkowym. Wynika z tego, że oś obrotu ma pochYLENIE  $1 : n$  takie samo jak krawędź odwodna filara i jak powierzchnia zewnętrzna sklepienia w linii zworników.

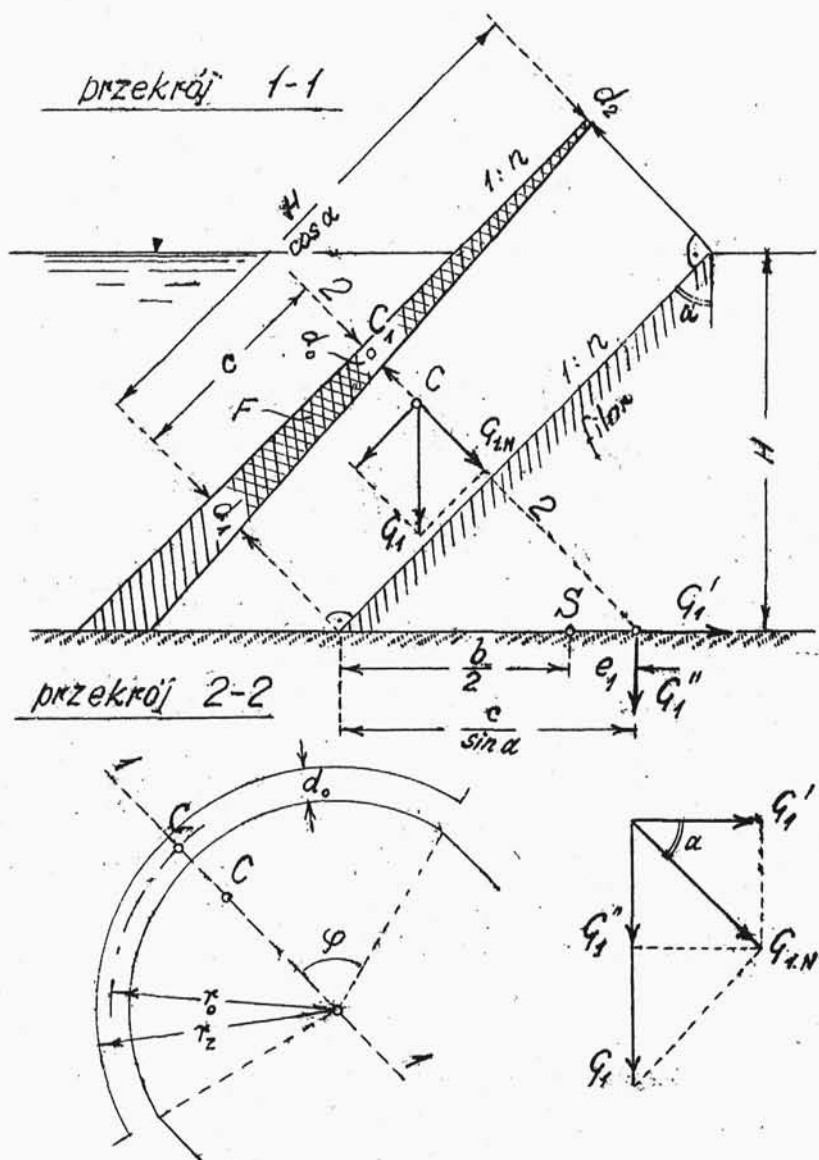
Niechaj  $F$  oznacza pole przekroju sklepienia płaszczyzną 1 - 1 /rys. 53/, jego środek ciężkości znajduje się w  $C_1$ . Objętość bryły obrotowej otrzymanej wskutek obrotu pola  $F$  koło osi, leżącej w jego płaszczyźnie, lecz nie przecinającej tego pola, równa się iloczynowi pola  $F$  i drogi, jaką w czasie obrotu przebiegnie środek ciężkości  $C_1$ .

$$\text{Zatem } V_1 = F 2 \varphi r_0 ;$$

$\varphi$  w radianach.

Pole przekroju sklepienia

$$F = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \frac{H}{\cos \alpha} ;$$



rys. 53

Odległość punktu  $C_1$  od osi obrotu

$$r_0 = r_2 - \frac{d_0}{2} ;$$

$$r_2 = \frac{l_2}{\sin \varphi} ;$$

$d_0$  - jest to grubość sklepienia w głębokości średka ciężkości; wielkość  $d_0$  określa się z proporcji, uwzględniającej liniową zmianę grubości sklepienia

$$d_0 = d_1 - (d_1 - d_2) \cdot \frac{c}{\frac{H}{\cos \alpha}} ;$$

$c$  - jest to odległość punktu  $C_1$  od krawędzi odwodnej podstawy filara. Odległość tę określa wzór /dla trapezu/

$$c = \frac{1}{3} \cdot \frac{H}{\cos \alpha} \cdot \frac{d_1 + 2d_2}{d_1 + d_2} ;$$

Ostatecznie więc

$$r_0 = \frac{l_2}{\sin \varphi} - \frac{1}{3} \cdot \frac{d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2}{d_1 + d_2} ;$$

Mając określoną objętość sklepienia, wyznaczamy ciężar własny sklepienia

$$G_1 = \gamma_0 V_1 ;$$

$\gamma_0$  - ciężar właściwy żelbetu /2,4 t/m<sup>3</sup> /, lub betonu /2,3 t/m<sup>3</sup> /, z których wykonane jest skle-

pienie. Punkt zaczepienia ciężaru  $G_1$  znajduje się w  $C$  /środek ciężkości całego sklepienia/, który leży w tym samym przekroju co  $C_1$  /nie należy mylić tych dwóch punktów/.

Składowa normalna  $G_{1N}$ , która przenosi się na filar, ma wielkość

$$G_{1N} = G_1 \cdot \sin \alpha ;$$

a jej składowe: pozioma i pionowa, pamiętając że

$$\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{n}{\sqrt{1 + n^2}} ;$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + n^2}} ;$$

wyniosą

$$G_1' = G_{1N} \cdot \cos \alpha = \gamma_0 H (d_1 + d_2) \varphi r_0 \frac{n}{\sqrt{1 + n^2}} ;$$

$$G_1'' = G_{1N} \cdot \sin \alpha = \gamma_0 H (d_1 + d_2) \varphi r_0 \frac{1}{\sqrt{1 + n^2}} ;$$

Odległość środka ciężkości  $C$  /całego sklepienia/ od krawędzi odwodnej podstawy filara wynosi  $c$  /tak samo jak dla  $C_1$  = rys.53/.

Mimośród  $e_1$  składowej  $G_1''$  względem  $S$  wynosi

$$e_1 = \frac{c}{\sin \alpha} - \frac{b}{2} ;$$

Wstawiając odpowiednie wielkości i pamiętając, że  $b = (m+n) \cdot H$  otrzymujemy

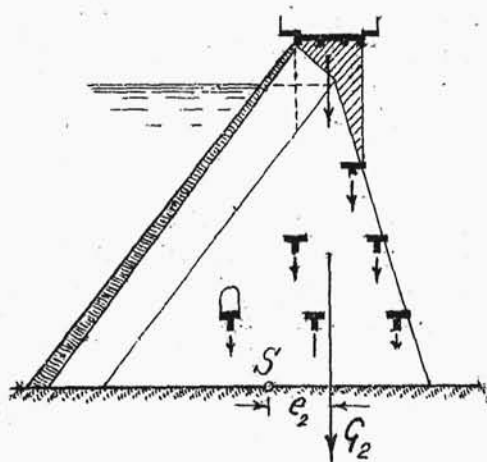
$$e_1 = H \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{1+n^2}{n} \cdot \frac{d_1+2d_2}{d_1+d_2} - \frac{m+n}{2} \right);$$

Dodatkowe naprężenia wywołane obciążeniem filarów ciężarem sklepień wynoszą:

$$\sigma'_{1,2} = \frac{G_1''}{A} + \frac{G_1'' e_1}{W};$$

#### Wpływ korony i belek stężających.

Na wielkość dodatkowego obciążenia  $G_2$  składają się: ciężar korony zapory /wraz z filarkami podtrzymującymi koronę i z jezdnią drogi ułożonej



rys. 54.

na koronie / oraz suma ciężarów wszystkich belek stężających i wiążących filary w jedną konstrukcyjną całość /rys. 54/.

Ciężar  $G_2$  oblicza się dla jednego przęsła /t.j. na długości  $L$  /

najprościej wykreślić na podstawie szkicu projektu zapory. Jeśli obliczymy wielkość wypadkowej  $Q_2$  i jej odległość  $e_2$  od środka podstawy  $S$ , łatwo będzie następnie obliczyć dodatkowe naprężenia

$$\sigma_{1,2}'' = \frac{Q_2}{A} \mp \frac{Q_2 e_2}{W};$$

#### Dodatkowe obciążenie filarów.

Filary są obciążone siłami działającymi nie tylko w płaszczyźnie symetrii filara, jak to miało miejsce we wszystkich wyżej opisanych przypadkach, lecz także siłami bocznymi, działającymi równoległe do osi zapory.

Siły boczne występują wtedy, gdy wskutek spadku temperatury i wskutek skurczu betonu zmniejsza się rozpiętość łuków. Wtedy filar od strony wody narażony jest na rozrywanie boczne, w kierunku prostopadłym do płaszczyzny symetrii filara.

Jednak praktyka wykazuje, że te naprężenia rozrywające nie mają groźnych następstw, gdyż w wykonanych dotąd zaporach nie stwierdzono pęknięć, które można byłoby przypisać wyżej omawianym siłom.



Zabezpieczenie przed poślizgiem.

Wobec lekkości zapory o łukach wielokrotnych na czoło zagadnień statyczno wytrzymałościowych wysuwa się kwestia dostatecznego zabezpieczenia zapory przed poślizgiem, t.zn. zachowania nierówności

$$\frac{P'}{\sum N} \leq \operatorname{tg} \varphi ;$$

/porów.cz.I str.160/

gdzie  $\operatorname{tg} \varphi$  - jest współczynnikiem tarcia muru po skale i wynosi średnio 0,75

$\sum N$  - jest sumą sił pionowych.

Dla przybliżonego obliczenia wystarczy przyjąć

$$\sum N = G + P'' ;$$

jeśli jednak pragniemy uwzględnić wszystkie siły zewnętrzne, wówczas winna być zachowana nierówność

$$f = \frac{P' - P_s' + G_1'}{G + P'' - U - P_s'' + G_1'' + G_2} \leq \operatorname{tg} \varphi ;$$

Gdy przyjmiemy wzór uproszczony

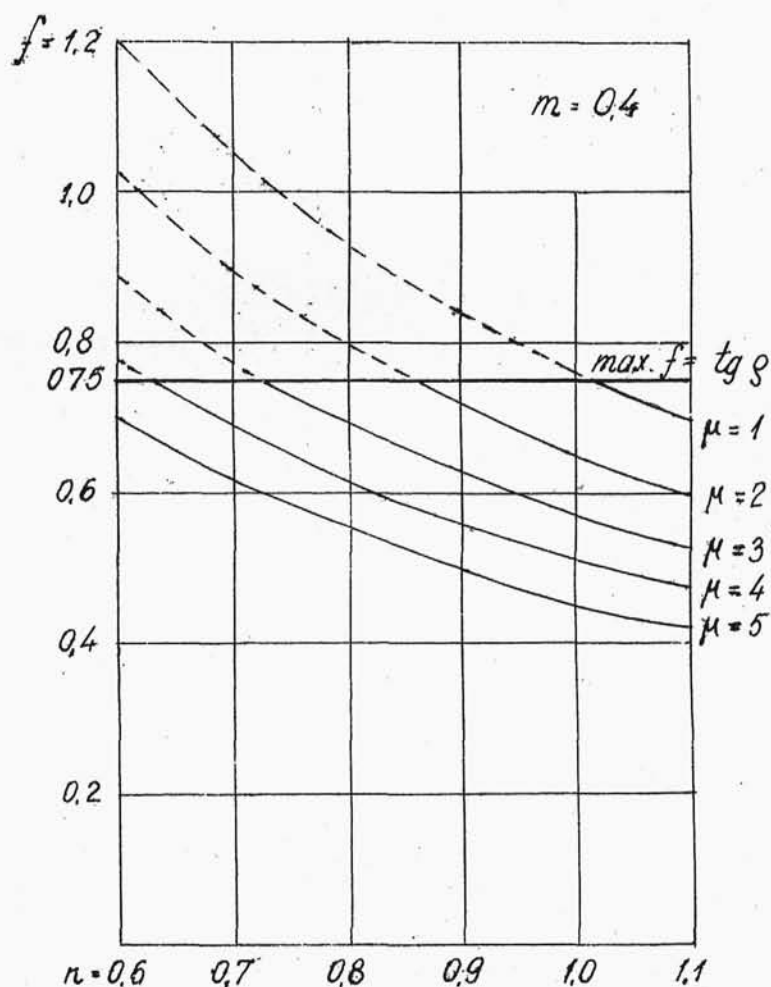
$$\frac{P'}{G + P''} \leq \operatorname{tg} \varphi ;$$

to wstawiając odpowiednie wielkości dla  $G$ ,  $P'$ , i  $P''$  /str.107 i 109/ otrzymujemy

$$f = \frac{1}{\frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_0}{\gamma} \cdot \lambda (m+n)(2\mu+1) + n} ;$$

Współczynnik poślizgu  $f$  wyrażony powyższym ułamkiem będzie tym mniejszy, t.zn. zabezpieczenie przed poślizgiem będzie tym większe, im większe uczynimy  $m$ ,  $n$  oraz  $\mu$ .

Na rys.55 podana jest w formie wykresu zależność współczynnika  $f$  od pochylenia ściany od



rys.55.

strony wody /  $n$  / oraz od stosunku  $\mu = \frac{a_1}{a_2}$   
dla  $m = 0,4$  przy czym  $\gamma_0 = 2,3 \text{ t/m}^3$  oraz  $\lambda = 0,1$ .

Wykres ten potwierdza, że przy odpowiednio dużym pochyleniu od strony wody otrzyma się odpowiednio mały współczynnik poślizgu, który poza tym będzie tym mniejszy, im większy uczynimy stosunek  $\frac{a_1}{a_2}$ ;

Gdyby wykonać podobne wykresy dla innych wartości  $m$ , to okazałoby się, że  $f$  jest mniejsze dla większych  $m$ , jednakże dominujący wpływ na wielkość współczynnika poślizgu ma wielkość pochylenia od strony wody:  $n$ .

Przy stałym  $m$  i  $n$  współczynnik poślizgu będzie większy dla mniejszych wysokości  $h$ .

We wzorze

$$f = \frac{1}{\frac{1}{3} \cdot \frac{\gamma_0}{f} \cdot \lambda (m+n)(2\mu+1) + n};$$

stosunek  $\mu$  w płaszczyźnie podstawy wynosi  $\frac{a_1}{a_2}$ , natomiast w dowolnej głębokości  $y$  /rys. 56/ stosunek  $\mu_y$  równa się  $\frac{a}{a_2}$ , więc jasne jest, że

$$\mu_y < \mu$$

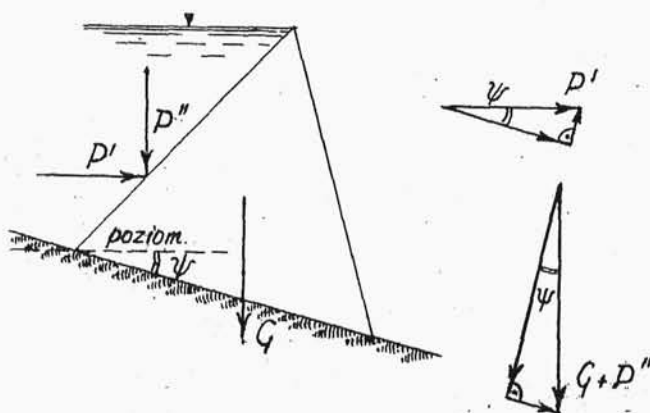
$$\text{bo } \frac{a}{a_2} < \frac{a_1}{a_2} \quad \text{skoro } a < a_1;$$

Okazuje się więc, że obliczenie współczynnika poślizgu w płaszczyźnie podstawy filara nie za -



bość  $\alpha$ , w podstawie, jednakże na ogół nie wykonywa się tego z powodu nieestetycznego wyglądu, a przed poślizgiem zabezpieczają zazębienia spodu filara wraz z ewentualnym zakotwieniem filara w skale oraz przyjęcie jak najmniejszej wielkości  $\max f$  dla najwyższego filara.

Jeśli podstawa filarów jest pochylona jak na rys. 57, wówczas stateczność zapory zmniejsza się. Wtedy bowiem stosunek sił równoległych i



rys. 57.

normalnych do płaszczyzny podstawy /uwzględniając tylko siły  $G$  i  $P$  / wynosi

$$f_1 = \frac{P' \cos \psi + (G + P'') \sin \psi}{(G + P'') \cos \psi - P' \sin \psi};$$

Dzieląc licznik i mianownik na  $(G + P'') \cos \psi$

i oznaczając  $\frac{P'}{G + P''} = f$  ;

otrzymuje się

$$f_s = \frac{f + \operatorname{tg} \psi}{1 - f \cdot \operatorname{tg} \psi} > f ;$$

Zabezpieczenie przed wywróceniem filara.

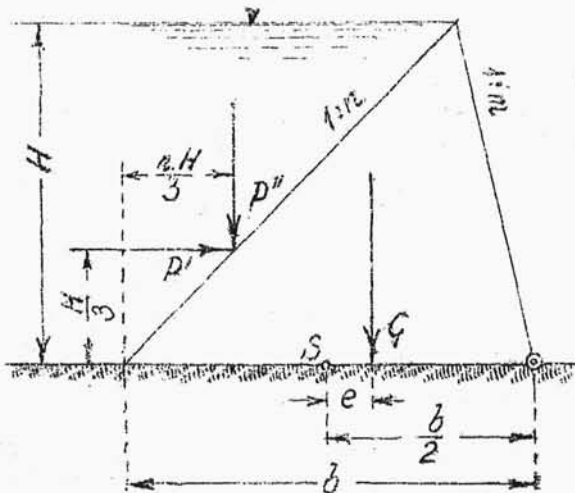
Warunkiem dostatecznego zabezpieczenia przed wywróceniem filara koło krawędzi odpornej podstawy jest zachowanie nierówności /rys.58/

$$\kappa = \frac{M_G + M_P''}{M_P'} > 1 ;$$

gdzie  $M_G = G \left( \frac{b}{2} - e \right) ;$

$$M_P'' = P'' \left( b - \frac{nH}{3} \right) ;$$

$$M_P' = P' \cdot \frac{H}{3} ;$$



Zwykle jednak przepisy wymagają, by bezpieczeństwo było 1,5 lub 2-krotne t.zn. by współczynnik stateczności  $\kappa \geq 1,5$  lub  $\kappa \geq 2$ ;

rys.58.

Wstawiając we wzór określający  $\kappa$  odpowiednie wartości, po przeróbkach i uproszczeniach otrzymuje się

$$\kappa = \frac{1}{4} \cdot \frac{\delta_0}{\beta} \cdot (m+n) \cdot \left[ (5m+3n)\mu + (3m+n) \right] + n(3m+2n);$$

Jak widać współczynnik stateczności będzie tym większy, im większe uczynimy  $m$ ,  $n$  oraz  $\mu$ .

Z powyższego równania można też otrzymać najmniejsze dopuszczalne pochylenie  $n$  dla danego  $m$  i  $\mu$  oraz dla ustalonej wielkości  $\kappa$ . Można też założyć sobie pochylenie  $n$ , a znaleźć odpowiednie pochylenie od strony powietrza  $m$ .

Jeśli uwzględnimy wszystkie siły zewnętrzne, to wówczas

$$\kappa = \frac{M_G + M_P'' - M_{PS}'' + M_{G1}'' + M_{G2}}{M_P' + M_U};$$

gdzie wpływ wyporu określa

$$M_U = U \left( b - \frac{a_1}{3} \right); \quad \text{/rys.48/}$$

$$\text{lub } M_U = U \cdot \frac{2}{3} \cdot b; \quad \text{/rys.49/}$$

wpływ niejednostajnie rozłożonego parcia wody

$$M_{PS}'' = P_s'' \left( \frac{b}{2} - e_s \right); \quad \text{/rys.52/}$$

wpływ ciężaru sklepienia.

$$M_{q_1}'' = q_1'' \left( \frac{b}{2} - e_1 \right); \quad \text{/rys. 53/}$$

wpływ ciężaru korony i belek stężających

$$M_{q_2} = q_2 \left( \frac{b}{2} - e_2 \right); \quad \text{/rys. 54/}$$

### Wyboczenie filarów.

Niebezpieczeństwo wyboczenia filarów bez wątplenia istnieje i to tym większe, im filar jest cieńszy i wyższy oraz im większe jest jego obciążenie. Matematyczne ujęcie tego zagadnienia napotyka jednak na nieprzezwyciężone trudności i nie zostało dotychczas podane w formie nadającej się do powszechnego stosowania, a przede wszystkim w formie opartej na przekonujących założeniach. Wyboczenie filara jest istotnie zjawiskiem bardzo złożonym, całkowicie swoistym, nie posiadającym sobie podobnego w całej dziedzinie statyki budowli.

Wyboczenie może nastąpić tylko w kierunku prostym do płaszczyzny symetrii filara. Ponieważ podstawa filara jest zamocowana w skale /często nawet zakotwiona/, więc jej odkształcenie jest