

NIELS KREBS OVESEN

GEOTEKNISK EKSEMPELSAMLING

UDGIVET SOM MANUSKRIFT AF
DANMARKS INGENIØRAKADEMI
BYGNINGSAFDELINGEN KBH. 1965

Bind 1

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. INDLEDNING

2. GULVENS BEREGNENDE LAFENTICHER

Eksempel 2.1: Fordelt og samlet af jord vand,..... 6

Eksempel 2.2: Samlet af jord vand, jordens vandholdende evne og vand

NIELS KREBS OVESEN

GEOTEKNISK EKSEMPELSAMLING

3. GULVETS VAND

Eksempel 3.1: Vandløber i jord med ubestemt grundvand, 12

Eksempel 3.2: Vandløber i jord med ubestemt grundvand og med kapillæritet,..... 14

Eksempel 3.3: Vandløber i jord med fast strømnings grundvand,..... 18

4. STRØMNING

Eksempel 4.1: Bestemmelse af permanentvandskoefficient ud fra vandstrømnings,..... 22

Eksempel 4.2: Strømme for uligartet strømning med ubestemt grundvand,..... 26

Eksempel 4.3: Strømme for strømning uden vandbegrænsning, 30

Eksempel 4.4: Strømme for strømning uden vandbegrænsning,..... 34

Eksempel 4.5: Strømme for strømning med fast grundvandspejl, 38

Eksempel 4.6: Strømme for strømning med grundvandspejl, 42

Eksempel 4.7: Bestemmelse af vandstrømning ud fra strømme,..... 46

Eksempel 4.8: Bestemmelse af permanentvandskoefficient ud fra strømme, 50

Eksempel 4.9: Bestemmelse af faktor for strømme ud fra strømme, 54

UDGIVET SOM MANUSKRIFT AF DANMARKS INGENIØRAKADEMI BYGNINGSAFDELINGEN KBH. 1965

Bind 1

INDHOLDSFORTEGNELSE

1 INDLEDNING

2 GRUNDLÆGGENDE DEFINITIONER

Eksempel 2.1: Poretal og rumvægt af tørt sand.....	6
Eksempel 2.2: Mætningsgrad, poretal, vandindhold og rumvægt af fugtigt sand.....	8
Eksempel 2.3: Vandindhold, poretal, kornvægtfylde og rumvægt af vandmættet ler.....	10

3 GEOSTATIK

Eksempel 3.1: Spændinger i jord med stillestående grundvand.	12
Eksempel 3.2: Spændinger i jord med stillestående grundvand og med kapillaritet.....	14
Eksempel 3.3: Spændinger i jord med lodret strømmende grundvand.....	18

4 STRØMNING

Eksempel 4.1: Bestemmelse af permeabilitetskoefficient ud fra laboratorieforsøg.....	22
Eksempel 4.2: Strømnet for afgrænset strømning med singulære punkter	24
Eksempel 4.3: Strømnet for strømning uden sidebegrænsning..	28
Eksempel 4.4: Strømnet for strømning uden nedre begrænsning.....	32
Eksempel 4.5: Strømnet for strømning med frit grundvandspejl	36
Eksempel 4.6: Strømnet for strømning med stagnationspunkt..	40
Eksempel 4.7: Bestemmelse af vandtilstrømning ud fra strømnet.....	44
Eksempel 4.8: Bestemmelse af porevandstryk ud fra strømnet..	46
Eksempel 4.9: Bestemmelse af faren for erosion ud fra strømnet.....	50

Eksempel 4.10: Bestemmelse af faren for løftning af byggegrubes bund.....	52
---	----

5 DEFORMATIONER

Eksempel 5.1: Bestemmelse af dekadehældningen for normalt-konsolideret ler.....	54
Eksempel 5.2: Bestemmelse af konsolideringsmodulen for forkonsolideret ler.....	56
Eksempel 5.3: Konsolideringssætning af sribefundament på normalt-konsolideret ler.....	60
Eksempel 5.4: Konsolideringssætning af enkeltfundament på forkonsolideret ler.....	62
Eksempel 5.5: Konsolideringssætning af enkeltfundament på lagdelt jord.....	64
Eksempel 5.6: Konsolideringens tidsforløb.....	68
Eksempel 5.7: Konsolideringssætning ved uændrede totale spændinger.....	70

INDLEDNING

Nærværende geotekniske eksempelsamling er udarbejdet som supplement til det eksisterende lærebogsstof i faget Fundering ved Danmarks Ingeniørakademis Bygningsafdeling.

Med erfaring i 5 års undervisning ved DIAB har det vist sig, at forståelsen af mange af de elementære geotekniske problemer volder de studerende vanskeligheder. Denne eksempelsamling er derfor udarbejdet med specielt henblik på at lette tilegnelsen af det elementære stof. Hvert eksempel behandler således kun eet geoteknisk problem, samtidig med at de forskellige emner er belyst med flere eksempler af stigende sværhedsgrad.

Eksempelsamlingen er delt i 12 afsnit med samme emner som de tilsvarende afsnit i den under udarbejdelse værende lærebog i faget.

Ved udarbejdelsen af eksemplerne har akademiingeniør R. Sørensen og civilingeniørerne J. Davidsen og O. Mortensen ydet værdifuld assistance. Tegningerne er udført af fru R. Larsen, medens frøken G. Levinsen har udført maskinskrivningen af manuskriptet.

Jeg takker mine medarbejdere for den dygtige assistance og store interesse, de har udvist ved udarbejdelsen af denne eksempelsamling.

N. Krebs Ovesen

EKSEMPEL 2.1: Poretal og rumvægt af tørt sand.GIVET

En prøve af tørt kvartssand har volumenet 244 cm^3 ; prøvens vægt er 382 g.

ØNSKES

Find prøvens poretal og rumvægt.

LØSNING

Kornvægtfylden d_s for kvarts er 2,65. Mætningsgraden S_w er nul, da sandet er tørt.

Poretallet er:

$$e = \frac{\text{porevolumen}}{\text{kornvolumen}} = \frac{\text{totalvolumen} - \text{kornvolumen}}{\text{kornvolumen}}$$

$$= \frac{\text{totalvolumen}}{\text{kornvolumen}} - 1 = \frac{244 \cdot 2,65}{382} - 1 = 0,69$$

Rumvægten er:

$$\gamma_d = \frac{d_s + eS_w}{1 + e} \gamma_w = \frac{2,65 + 0}{1 + 0,69} 1,00 = 1,57 \text{ t/m}^3$$

KONKLUSION

Sandprøven har poretallet $e = 0,69$ og rumvægten $\gamma_d = 1,57 \text{ t/m}^3$.

EKSEMPEL 2.2: Mætningsgrad, poretal, vandindhold og rumvægt af fugtigt sand.

GIVET

En prøve af fugtigt sand med volumenet 357 cm^3 vejer 531 g. Prøven ovntørres, hvorefter dens vægt findes at være 484 g. Kornmaterialets vægtfylde d_s er ved pyknometerforsøg bestemt til 2,67.

ØNSKES

Find prøvens mætningsgrad, poretal, vandindhold og rumvægt.

LØSNING

Vandet i prøven har vejet $531 - 484 = 47 \text{ g}$; det har således haft volumenet 47 cm^3

$$\text{Kornvolumen} = \frac{\text{kornvægt}}{\gamma_w \cdot d_s} = \frac{484}{1 \cdot 2,67} = 181 \text{ cm}^3$$

$$\text{Porevolumen} = \text{totalvolumen} - \text{kornvolumen} = 357 - 181 = 176 \text{ cm}^3$$

Mætningsgraden er:

$$S_w = \frac{\text{vandvolumen}}{\text{porevolumen}} = \frac{47}{176} = 0,27$$

Poretallet er:

$$e = \frac{\text{porevolumen}}{\text{kornvolumen}} = \frac{176}{181} = 0,97$$

Vandindholdet er:

$$w = \frac{\text{vandvægt}}{\text{kornvægt}} = \frac{47}{484} = 0,097 = 9,7 \text{ ‰}$$

$$\left(= \frac{eS_w}{d_s} = \frac{0,97 \cdot 0,27}{2,67} \right)$$

Rumvægten er:

$$\gamma = \frac{\text{totalvægt}}{\text{totalvolumen}} = \frac{531}{357} = 1,49 \text{ g/cm}^3 = 1,49 \text{ t/m}^3$$

$$\left(= \frac{d_s + eS_w}{1 + e} \gamma_w = \frac{2,67 + 0,97 \cdot 0,27}{1 + 0,97} \cdot 1,0 \right)$$

KONKLUSION

Sandprøven har mætningsgraden $S_w = 0,27$, poretallet $e = 0,97$, vandindholdet $w = 9,7 \text{ ‰}$ og rumvægten $\gamma = 1,49 \text{ t/m}^3$.

EKSEMPEL 2.3: Vandindhold, poretal, kornvægtfylde og rumvægt af vandmættet ler.

GIVET

En lerprøve, som er optaget under grundvandspejlet, har volumenet 20 cm^3 , og den vejer 43 g. Prøven ovntørres, hvorefter dens vægt findes at være 36 g.

ØNSKES

Find lerprøvens vandindhold, poretal, kornvægtfylde og rumvægt.

LØSNING

Da prøven er optaget under grundvandspejlet er den vandmættet. Mætningsgraden S_w er følgelig lig 1,0. Vandet i prøven har vejet $43 - 36 = 7 \text{ g}$. Det har således haft volumenet 7 cm^3 . Kornvolumenet er da $20 - 7 = 13 \text{ cm}^3$.

Vandindholdet er:

$$w = \frac{\text{vandvægt}}{\text{kornvægt}} = \frac{7}{36} = 0,195 = 19,5 \text{ ‰}$$

Poretallet er:

$$e = \frac{\text{porevolumen}}{\text{kornvolumen}} = \frac{7}{13} = 0,54$$

Kornvægtfylden er:

$$d_s = \frac{\text{kornvægt}}{\text{kornvolumen}} \cdot \frac{1}{\gamma_w} = \frac{36}{13} \cdot \frac{1}{1,0} = 2,77$$

$$\left(= \frac{eS_w}{w} = \frac{0,54 \cdot 1,00}{0,195} \right)$$

Rumvægten er:

$$\gamma_m = \frac{\text{totalvægt}}{\text{totalvolumen}} = \frac{43}{20} = 2,15 \text{ g/cm}^3 = 2,15 \text{ t/m}^3$$

$$\left(= \frac{d_s + eS_w}{1 + e} \gamma_w = \frac{2,77 + 0,54 \cdot 1,00}{1 + 0,54} \cdot 1,0 \right)$$

KONKLUSION

Lerprøven har vandindholdet $w = 19,5 \text{ ‰}$, poretallet $e = 0,54$, kornvægtfylden $d_s = 2,77$ og rumvægten $\gamma_m = 2,15 \text{ t/m}^3$.

EKSEMPEL 3.1: Spændinger i jord med stillestående grundvand.GIVET

På en given lokalitet er jordbundsforholdene følgende:

JOF er i kote + 12,0

Fra kote + 12,0 til kote + 11,0: Fyld med $\gamma = 1,5 \text{ t/m}^3$

- - - + 11,0 - - + 8,0: Sand med $\gamma = 1,7 \text{ t/m}^3$,
 $\gamma_m = 1,9 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 0$

- - + 8,0 - - + 2,0: Ler med $\gamma_m = 2,1 \text{ t/m}^3$

Under kote + 2,0 : Fjeld

GVS står i kote + 10,0.

ØNSKES

Bestem de lodrette effektive spændinger i jorden under anvendelse af:

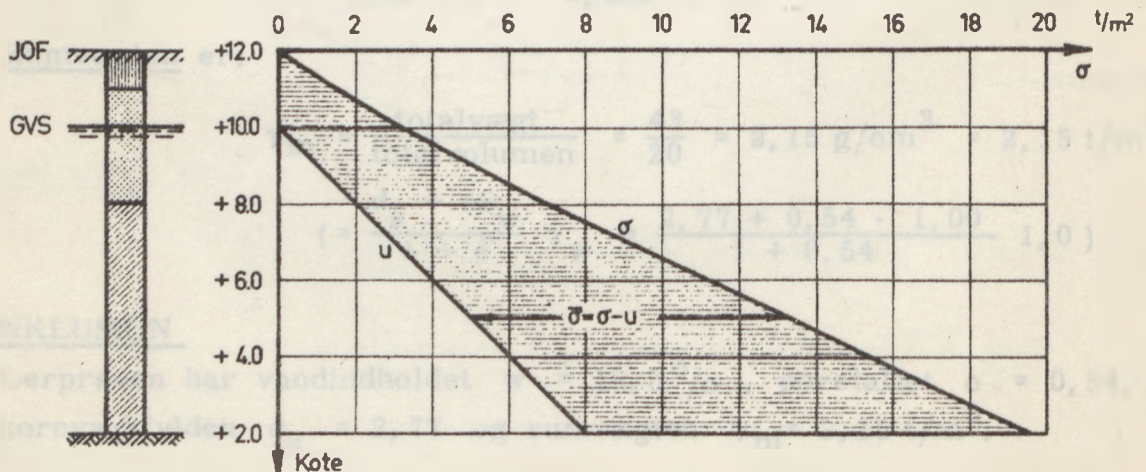
A. $\bar{\sigma} = \sigma - u$

B. $\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d$

LØSNING A. ($\bar{\sigma} = \sigma - u$)

Beregningerne udføres i nedenstående skema:

kote	$\sigma = \sum \gamma d$ (t/m ²)	u (t/m ²)	$\bar{\sigma} = \sigma - u$ (t/m ²)
+ 12,0	0	-	0
+ 11,0	$0 + 1,5 \cdot 1,0 = 1,5$	-	1,5
+ 10,0	$1,5 + 1,7 \cdot 1,0 = 3,2$	0	3,2
+ 8,0	$3,2 + 1,9 \cdot 2,0 = 7,0$	2,0	5,0
+ 2,0	$7,0 + 2,1 \cdot 6,0 = 19,6$	8,0	11,6

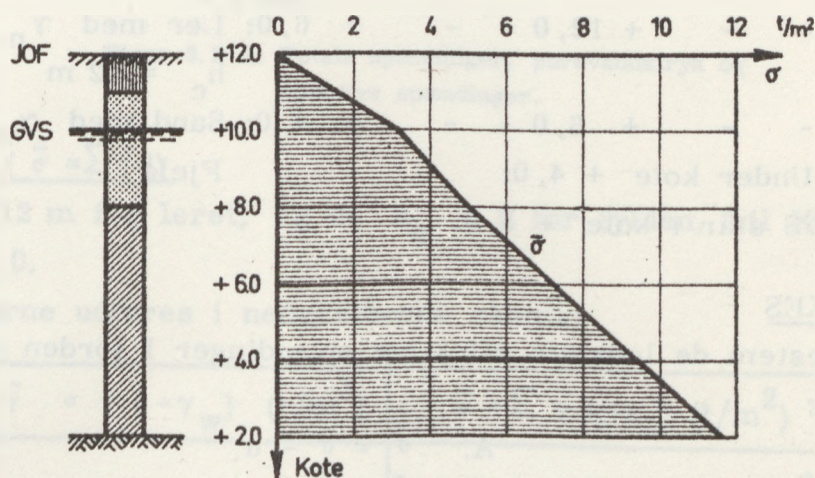


Figur 3.1 A: Totale spændinger, porevandttryk og effektive spændinger.

LØSNING B. ($\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d$)

Beregningerne udføres i nedenstående skema:

kote	$\bar{\gamma} = \gamma (-\gamma_w) \text{ (t/m}^3\text{)}$	$\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d \text{ (t/m}^2\text{)}$
+ 12,0		0
+ 11,0	1,5	$0 + 1,5 \cdot 1,0 = 1,5$
+ 10,0	1,7	$1,5 + 1,7 \cdot 1,0 = 3,2$
+ 8,0	$1,9 - 1,0 = 0,9$	$3,2 + 0,9 \cdot 2,0 = 5,0$
+ 2,0	$2,1 - 1,0 = 1,1$	$5,0 + 1,1 \cdot 6,0 = 11,6$



Figur 3.1 B: Effektive spændinger.

KONKLUSION

På den givne lokalitet varierer de lodrette effektive spændinger i jorden retlinet mellem følgende værdier:

kote	$\bar{\sigma} \text{ (t/m}^2\text{)}$
12,0	0
11,0	1,5
10,0	3,2
8,0	5,0
2,0	11,6

EKSEMPEL 3.2: Spændinger i jord med stillestående grundvand og med kapillaritet.

GIVET

På en lokalitet er jordbundsforholdene følgende:

JOF er i kote + 14,0

Fra kote + 14,0 til kote + 12,0: Fyld med $\gamma = 1,4 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 0$.

- - + 12,0 - - + 6,0: Ler med $\gamma_m = 2,0 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 12 \text{ m}$

- - + 6,0 - - + 4,0: Sand med $\gamma_m = 1,9 \text{ t/m}^3$

Under kote + 4,0: Fjeld

GVS står i kote + 8,0.

ØNSKES

Bestem de lodrette effektive spændinger i jorden under anvendelse af:

A. $\bar{\sigma} = \sigma - u$

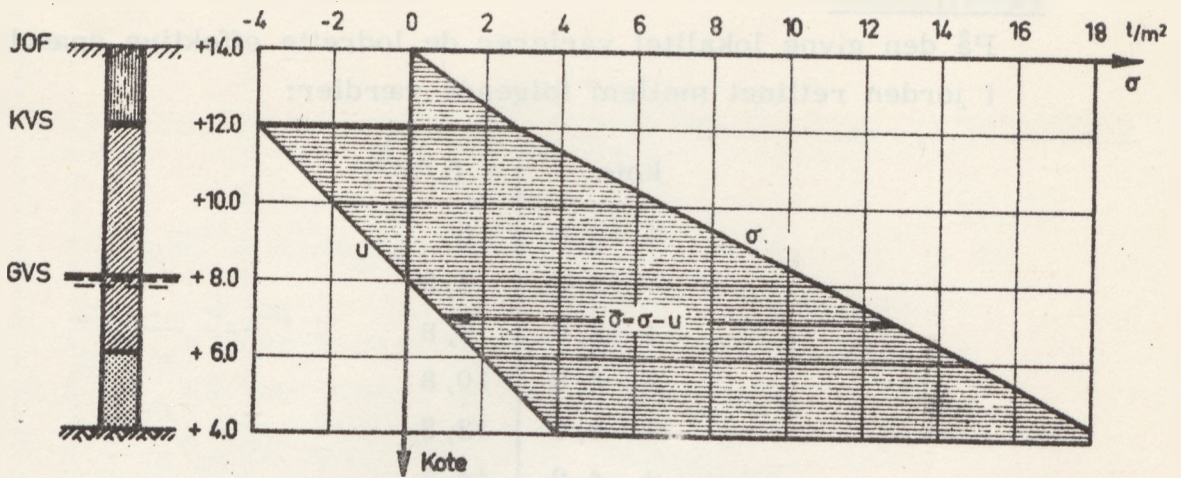
B. $\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma} d$

LØSNING A. ($\bar{\sigma} = \sigma - u$)

Da $h_c = 12 \text{ m}$ for leret, og da $h_c = 0$ for fylden, vil KVS stå i kote + 12,0.

Beregningerne udføres i nedenstående skema:

kote	$\sigma = \sum \gamma d$ (t/m^2)	u (t/m^2)	$\sigma = \bar{\sigma} - u$ (t/m^2)
+ 14,0	= 0	-	0
+ 12,0	$0 + 1,4 \cdot 2,0 = 2,8$	-	2,8
+ 12,0	= 2,8	- 4,0	6,8
+ 8,0	$2,8 + 2,0 \cdot 4,0 = 10,8$	0	10,8
+ 6,0	$10,8 + 2,0 \cdot 2,0 = 14,8$	+ 2,0	12,8
+ 4,0	$14,8 + 1,9 \cdot 2,0 = 18,6$	+ 4,0	14,6



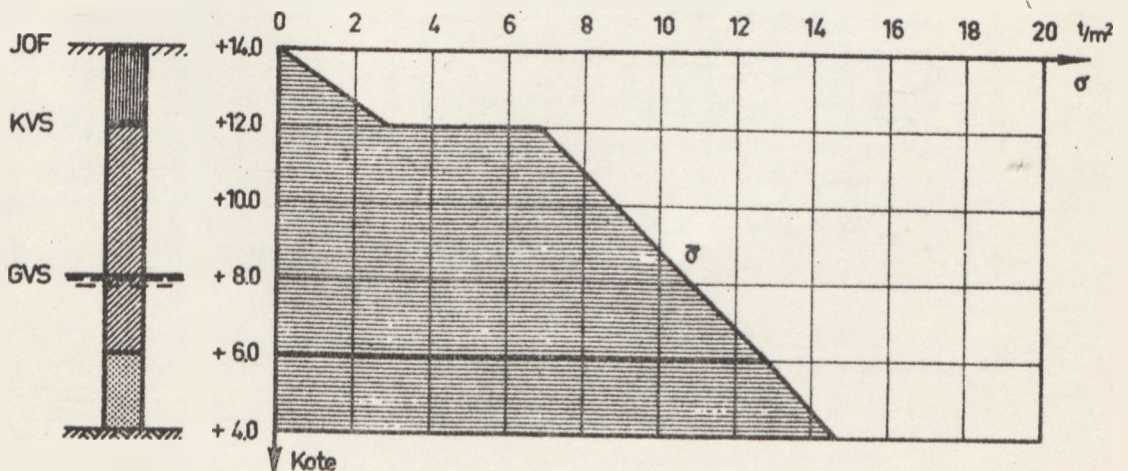
Figur 3.2 A: Totale spændinger, porevandstryk og effektive spændinger.

LØSNING B. ($\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d$)

Da $h_c = 12$ m for leret, og da $h_c = 0$ for fylden, vil KVS stå i kote + 12,0.

Beregningerne udføres i nedenstående skema:

kote	$\bar{\gamma} = \gamma (-\gamma_w)$ (t/m ³)	$\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d(+p_c)$ (t/m ²)
+ 14,0		0
+ 12,0	1,4	$0 + 1,4 \cdot 2,0 = 2,8$
+ 12,0	-	$2,8 + 4,0 = 6,8$
+ 8,0	$2,0 - 1,0 = 1,0$	$6,8 + 1,0 \cdot 4,0 = 10,8$
+ 6,0	$2,0 - 1,0 = 1,0$	$10,8 + 1,0 \cdot 2,0 = 12,8$
+ 4,0	$1,9 - 1,0 = 0,9$	$12,8 + 0,9 \cdot 2,0 = 14,6$



Figur 3.2 B: Effektive spændinger.

KONKLUSION

På den givne lokalitet varierer de lodrette effektive spændinger i jorden retlinet mellem følgende værdier:

kote	$\bar{\sigma}$ (t/m ²)
+ 14,0	0
+ 12,0	2,8
+ 12,0	6,8
+ 8,0	10,8
+ 6,0	12,8
+ 4,0	14,6

Spændingskomponent	Spændingskomponent	Spænding
σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
τ_{yx}	τ_{zy}	τ_{xz}
τ_{xz}	τ_{zx}	τ_{xy}
τ_{yz}	τ_{zy}	τ_{yx}
τ_{xy}	τ_{yx}	τ_{xz}
τ_{yz}	τ_{zy}	τ_{xy}
τ_{xz}	τ_{zx}	τ_{yz}
τ_{zx}	τ_{xz}	τ_{xy}
τ_{xy}	τ_{yx}	τ_{xz}
τ_{yz}	τ_{zy}	τ_{xy}
τ_{xz}	τ_{zx}	τ_{yz}
τ_{zx}	τ_{xz}	τ_{xy}



EKSEMPEL 3.3: Spændinger i jord med lodret strømmende grundvand.GIVET

På et vanddækket areal er jordbundsforholdene følgende:

Vandspejlet er i kote 0,0

Fra kote - 4,0 til kote - 6,0: Sand med $\gamma_m = 2,1 \text{ t/m}^3$

- - - 6,0 - - - 10,0: Silt med $\gamma_m = 1,9 \text{ t/m}^3$

- - - 10,0 - - - 11,0: Sand med $\gamma_m = 2,1 \text{ t/m}^3$

Under kote - 11,0 : Fjeld

Porevandet i det nederste sandlag har et potential svarende til kote + 5,0.

ØNSKES

Bestem de lodrette effektive spændinger i jorden under anvendelse af:

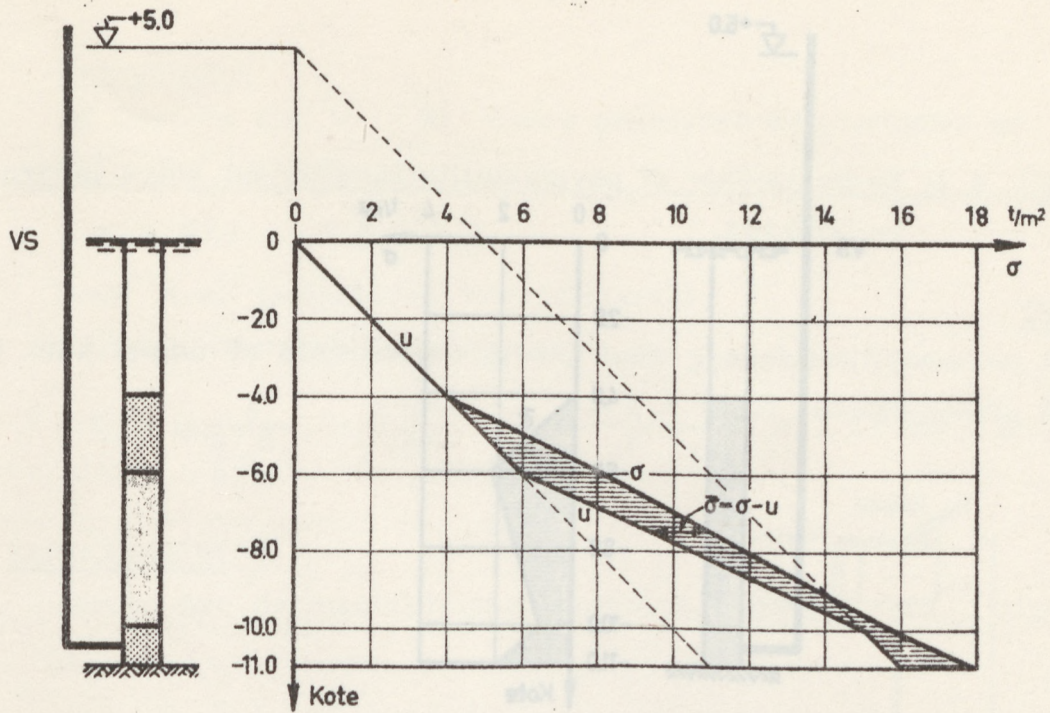
$$A. \quad \bar{\sigma} = \sigma - u$$

$$B. \quad \bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma}d$$

LØSNING A. ($\bar{\sigma} = \sigma - u$)

Spændingerne beregnes som vist i nedenstående skema:

kote	$\sigma = \sum \gamma d$ (t/m ²)	u (t/m ²)	$\bar{\sigma} = \sigma - u$ (t/m ²)
- 0,0	0	0	0
- 4,0	$0 + 1,0 \cdot 4,0 = 4,0$	4,0	0
- 6,0	$4,0 + 2,1 \cdot 2,0 = 8,2$	6,0	2,2
- 10,0	$8,2 + 1,9 \cdot 4,0 = 15,8$	15,0	0,8
- 11,0	$11,8 + 2,1 = 17,9$	16,0	1,9



Figur 3.3 A: Totale spændinger, porevandstryk og effektive spændinger.

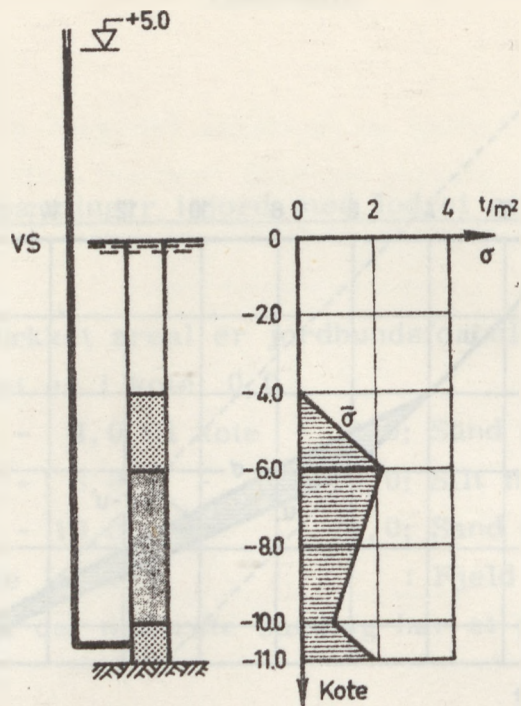
LØSNING B. ($\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma} d$)

Da potentialet ved siltlagets underside er større end ved oversiden, vil der gennem siltlaget foregå en opadrettet strømning med gradienten

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{5,0}{4,0} = 1,25$$

Spændingerne beregnes som vist i nedenstående skema:

kote	$\bar{\gamma} = \gamma_m - \gamma_w - i\gamma_w$ (t/m ³)	$\bar{\sigma} = \sum \bar{\gamma} d$ (t/m ²)
+ 0,0		0
- 4,0	1,0 - 1,0 = 0	0 + 0 = 0
- 6,0	2,1 - 1,0 = 1,1	0 + 1,1 · 2,0 = 2,2
- 10,0	1,9 - 1,0 - 1,25 · 1,0 = - 0,35	2,2 - 0,35 · 4,0 = 0,8
- 11,0	2,1 - 1,0 = 1,1	0,8 + 1,1 · 1,0 = 1,9



Figur 3.3 B: Effektive spændinger.

KONKLUSION

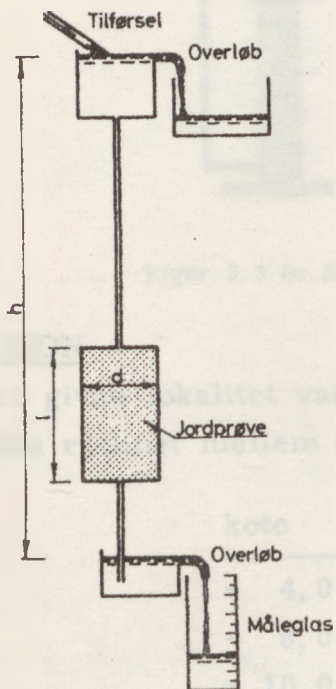
På den givne lokalitet varierer de lodrette effektive spændinger i jorden retlinet mellem følgende værdier:

kote	$\bar{\sigma}$ (t/m^2)
- 4,0	0
- 6,0	2,2
- 10,0	0,8
- 11,0	1,9

EKSEMPEL 4.1: Bestemmelse af permeabilitetskoefficient udfra laboratorieforsøg.

GIVET

Et permeabilitetsforsøg med konstant potentiale er udført som vist på principskitsen figur 4.1 A.



Figur 4.1A: Principskitse af permeabilitetsapparat med konstant potentiale.

Apparatets karakteristika er følgende:

Jordprøvens længde : $l = 7,5 \text{ cm}$

Jordprøvens diameter: $d = 4,2 \text{ cm}$

Potentialfald : $h = 150 \text{ cm}$

Ved forsøget målte man, at der på 290 sekunder strømmede 1000 cm^3 vand gennem jordprøven.

ØNSKES

Bestem jordens permeabilitetskoefficient k .

LØSNING

Forudsætning

Det forudsættes, at alle tryktab sker i jordprøven.

Beregninger

Af Darcy's lov $v = ki$ findes gennemstrømmingsmængden pr. tidsenhed:

$$q = Aki = \frac{\pi}{4} d^2 k \frac{h}{l}$$

hvor A er jordprøvens tværsnitsareal.

Permeabilitetskoefficienten findes nu:

$$k = q \frac{l}{\frac{\pi}{4} d^2 h} = \frac{1000}{290} \cdot \frac{7,5}{\frac{\pi}{4} \cdot 4,2^2 \cdot 150} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm/sek}$$

KONKLUSION

Jorden har permeabilitetskoefficienten $k = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm/sek}$.



EKSEMPEL 4.2: Strømnet for afgrænset strømning med singulære punkter.GIVET

I en grønlandsk havn skal opføres en forankret spunsvæg på en lokalitet, hvor jordbunden består af fjeld, hvis overflade hælder 45° med vandret udad i havnebassinet.

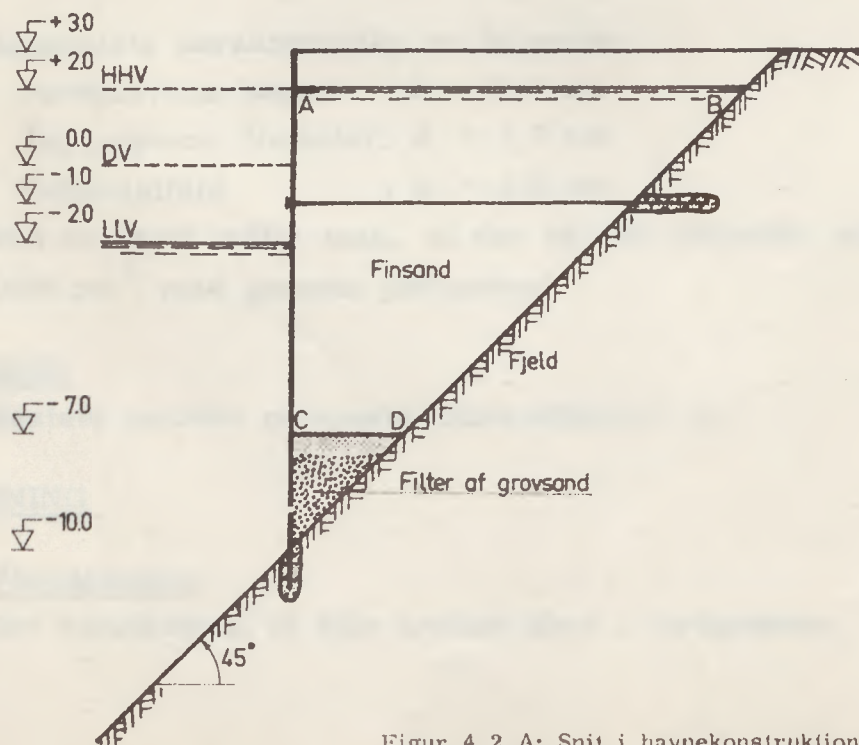
Kajplanet skal placeres i kote + 3,0. Kajfronten placeres, hvor vanddybden ved DV netop er 10,0 m. Spunsvæggens fodpunkt faststøbes i fjeldet og væggens øverste del fastholdes med en forankring i kote - 1,0.

Væggen bagfyldes med finsand, idet der dog under kote - 7,0 placeres et filter af grovsand. Spunsvæggen forsynes i kote - 9,0 med en række drænhuller. Finsandet har $h_c = 0$.

Daglig vande (DV) er i kote 0,0, højeste højvande (HHV) er i kote + 2,0, og laveste lavvande (LLV) er i kote - 2,0. Det må påregnes at vandspejlet i havnen på kort tid kan skifte fra HHV til LLV. Problemet kan betragtes som plant.

ØNSKES

Optegn strømnettet for den strømning, der opstår i finsandet, når vandspejlet i havnen pludselig skifter fra i længere tid at have stået i HHV til LLV.

LØSNING

Figur 4.2 A: Snit i havnekonstruktion.

Forudsætninger

Spunsvæggen regnes tæt.

Fjeldet regnes impermeabelt i forhold til finsandet.

Grænsebetingelser

Grundvandspejlet AB er en grænsepotentiallinie.

Laggrænsen CD er en grænsepotentiallinie, da potentialet overalt i punkter på linien er lig koten til LLV.

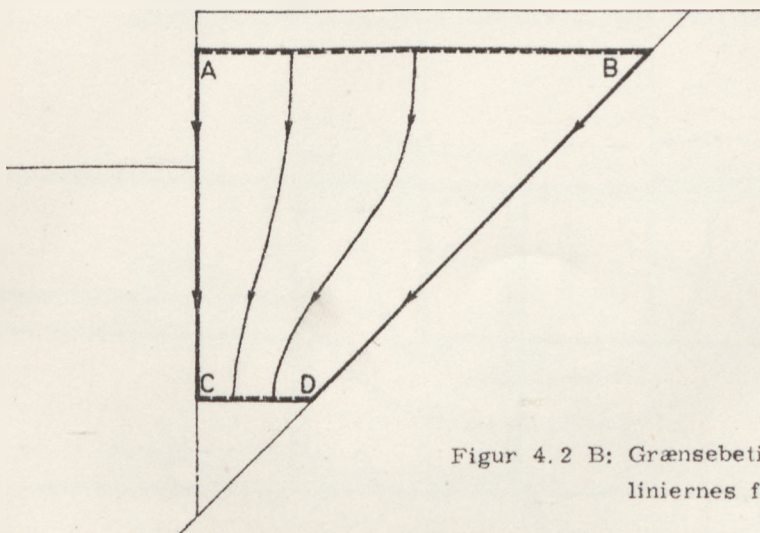
Spunsvæggen AC er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

Fjeldoverfladen BD er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

Punkt B og D er singulære punkter, da grænsestrømlinien og grænsepotentiallinien i disse punkter ikke står vinkelret på hinanden.

Strømnet

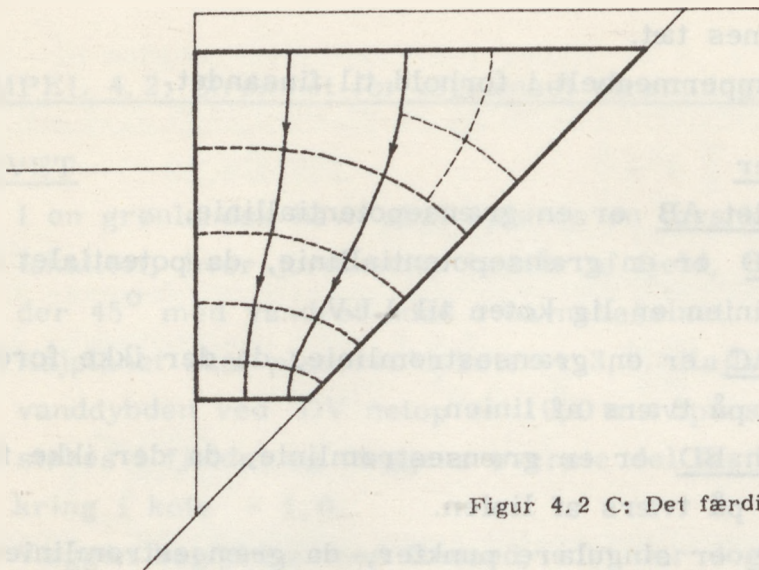
Figur 4.2 B viser grænsebetingelserne, ligesom der her er foretaget en skitsering af strømliniernes skønnede forløb.



Figur 4.2 B: Grænsebetingelser og skitsering af strømliniernes forløb.

Ved at forsøge sig frem tegnes nu strømnettet. Det færdige resultat er vist på figur 4.2 C. At det viste strømnet kan betragtes som tilfredsstillende fremgår af:

- 1) at grænsebetingelserne er opfyldt,
- 2) at strømlinier og potentiallinier står vinkelret på hinanden, samt
- 3) at strømlinier og potentiallinier danner kvadrater (bortset fra det brudne potentialspring).



Figur 4.2 C: Det færdige strømnet.

KONKLUSION

Strømnettet for den strømning, der opstår i finsandet, når vand-spejlet i havnen pludselig skifter fra HHV til LLV, er som vist på figur 4.2 C.

EKSEMPEL 4.3: Strømnet for strømning uden sidebegrænsning.GIVET

En massiv betondæmning er opført på en lokalitet med følgende jordbundsforhold:

Fra kote + 16,0 til kote + 8,0: Silt

Under kote + 8,0 : Fjeld

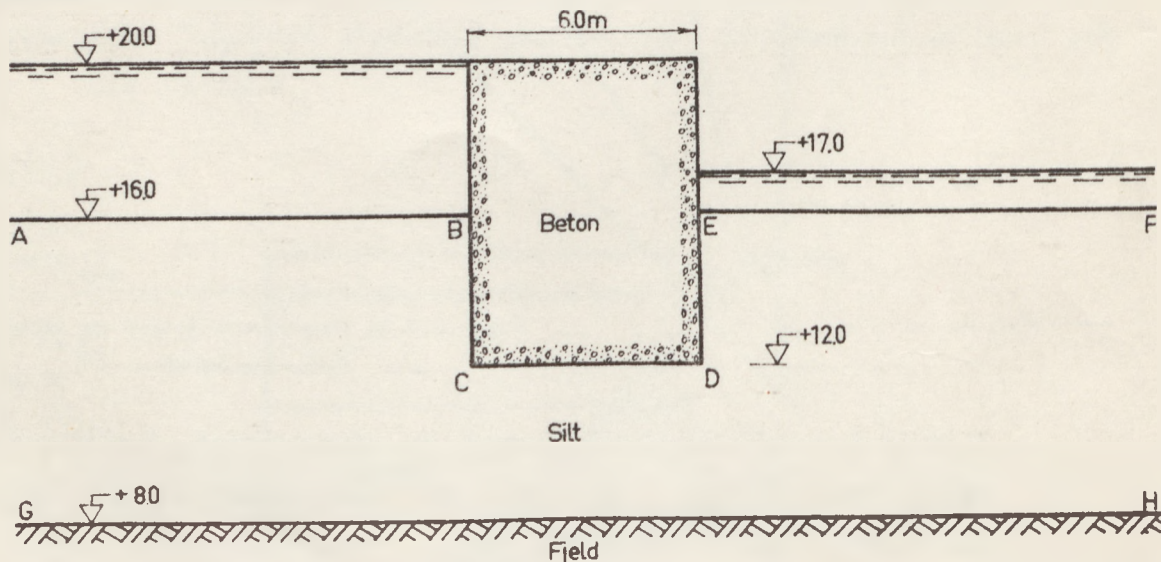
Vandspejlet på den ene side dæmningen står i kote + 20,0 og på den anden side dæmningen i kote + 17,0.

Dæmningens tværsnit er rektangulært med dimensionerne $B \cdot H = 6,0 \cdot 8,0 \text{ m}^2$. Dæmningens underside er placeret i kote + 12,0.

Problemet kan betragtes som plant, ligesom det kan forudsættes, at de optrædende laggrænser strækker sig uendeligt langt til begge sider.

ØNSKES

Optegn strømnettet for strømningen gennem silten.

LØSNING

Figur 4.3 A: Snit i betondæmning.

Forudsætninger

Betonen og fjeldet regnes impermeable i forhold til silten.

Grænsebetingelser

Siltoverfladen AB er en grænsepotentiallinie, da potentialet her er konstant lig vandspejlskoten på dæmningens venstre side.

Siltoverfladen EF er en grænsepotentiallinie, da potentialet her er konstant lig vandspejlskoten på dæmningens højre side.

Dæmningens sider og underside BCDE er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

Fjeldets overflade GH er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

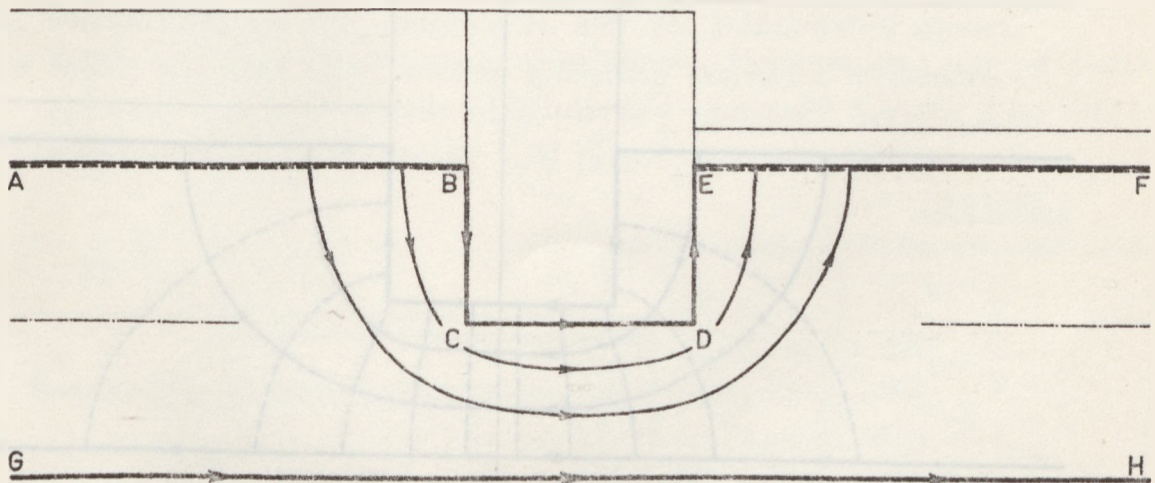
Punkt C og D er singulære punkter, da grænsestrømlinien her knækker.

Skæringspunktet mellem grænsepotentiallinien AB og grænsestrømlinien GH er et singulært punkt, der ligger uendeligt langt ude til venstre. I en vis afstand til venstre for punkt C skal potentiallinier og strømlinier da være symmetriske omkring midtlinien imellem de to parallelle grænsepotential- og grænsestrømlinier.

Tilsvarende forhold gør sig gældende for de to grænsepotential- og grænsestrømlinier tilhøjre for dæmningen.

Strømnet

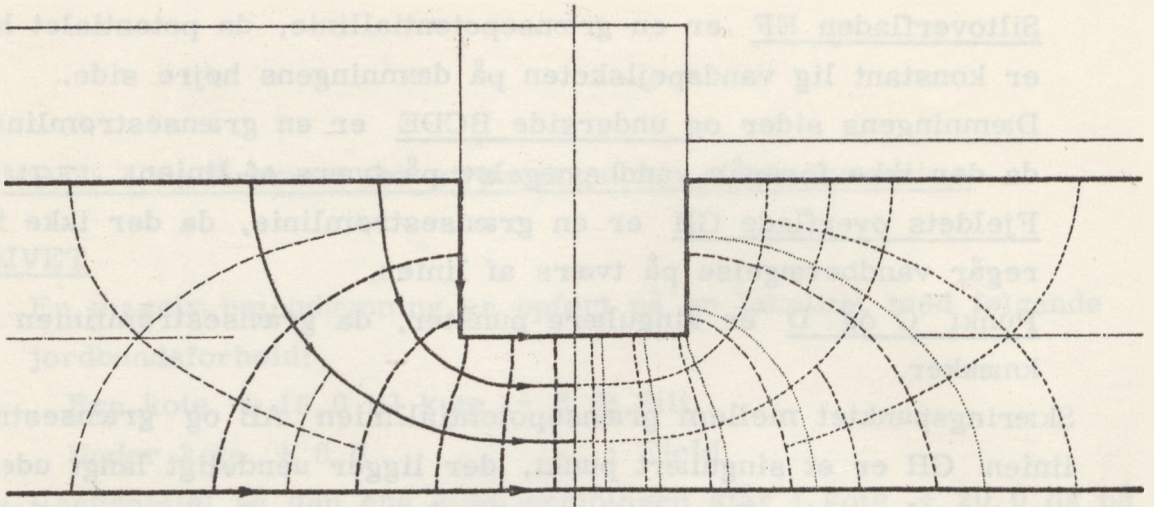
På figur 4.3 B er vist grænsebetingelserne, ligesom der her er foretaget en skitsering af strømlinierne skønnede forløb.



Figur 4.3 B: Grænsebetingelser og skitsering af strømlinierne skønnede forløb.

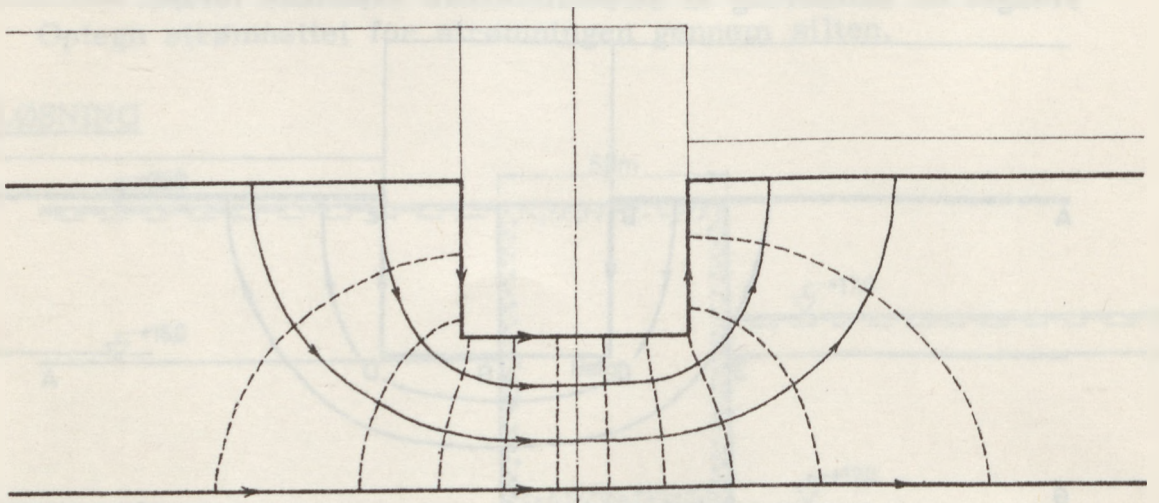
Det indses let, at strømnettet er symmetrisk omkring dæmningens lodrette midtlinie.

Ved at forsøge sig frem tegnes nu den del af strømnettet, der ligger til venstre for dæmningens lodrette midtlinie. Resultatet er vist på figur 4.3 C, hvor man samtidig, ved at spejlvende den venstre del af strømnettet, har fået et helt strømnet. Dette hele strømnet lider af den skønhedsfejl, at strømlinierne og potentiallinierne danner et brudt potentialspring omkring dæmningens midtlinie. Da det



Figur 4.3 C: Strømnettet under optegningen.

af hensyn til brugen af strømnettet er mest praktisk, at det brudne potentialspring placeres op mod en grænsepotentiallinie indtegnes i højre halvdel af strømnettet nye potentiallinier, således at man, som vist på figur 4.3 D, får det færdige resultat.



Figur 4.3 D: Det færdige strømnet.

At det viste strømnet kan betragtes som tilfredsstillende fremgår af:

- 1) at grænsebetingelserne er opfyldt,
- 2) at strømlinier og potentiallinier står vinkelret på hinanden, samt
- 3) at strømlinier og potentiallinier danner kvadrater (bortset fra det brudne potentialspring).

KONKLUSION

Strømnettet for strømmingen gennem silten er som vist på figur 4.3 D.

Forudsætninger

Spunsvæggen regnes tæt.

Grænsebetingelser

Kapillarvandspejlet AB er en grænsepotentiallinie, da potentialet overalt i punkter på linien er konstant lig koten til DV i havnen.

Havnebassinets bund DC er en grænsepotentiallinie, da potentialet overalt i punkter af linien er lig koten til LLV.

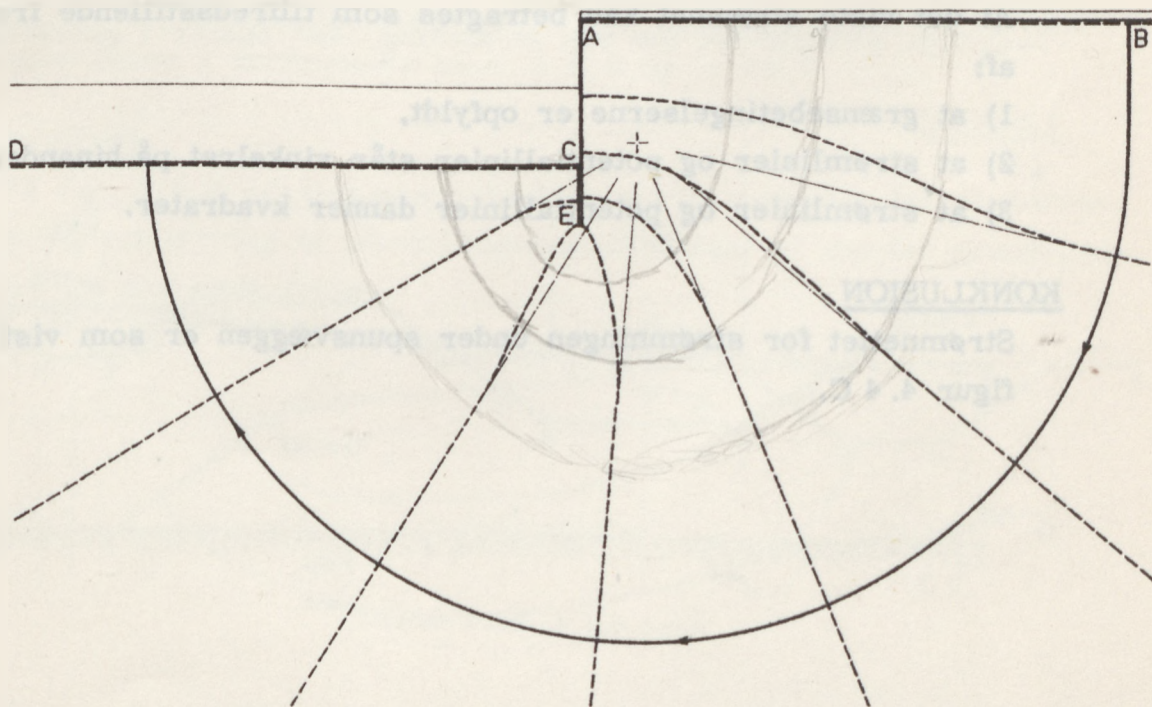
Spunsvæggen AEC er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

Punkt E er et singulært punkt, da grænsestrømlinien her knækker.

Som det fremgår af ovenstående, savnes den ene grænsestrømlinie, idet strømmingen foregår i et halvuendeligt rum. I en vis, stor afstand fra spunsvæggen vil strømlinierne da være cirkler med centrum umiddelbart tilhøjre for spunsvæggen, og potentiallinierne vil være radier i cirklerne.

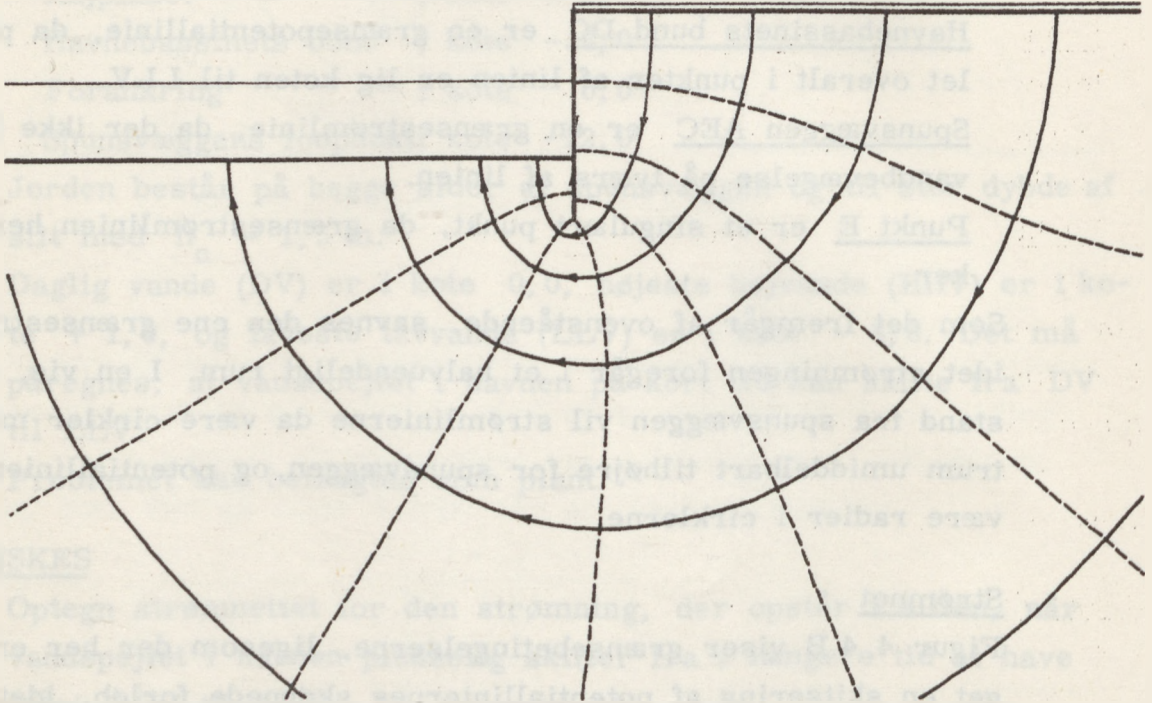
Strømnet

Figur 4.4 B viser grænsebetingelserne, ligesom der her er foretaget en skitsering af potentialliniernes skønnede forløb, idet det er valgt at tegne strømnettet med ialt 7 potentialspring.



Figur 4.4 B: Grænsebetingelser og skitsering af potentialliniernes forløb.

Ved at forsøge sig frem tegnes nu strømnettet, idet man starter med at tegne den strømkanal, der ligger inderst mod spunsvæggen. Efterhånden som optegningen skrider frem, rettes det skønnede forløb af potentiallinierne, indtil man kommer til det færdige strømnet, således som vist på figur 4.4 C.



Figur 4.4 C: Det færdige strømnet.

At det viste strømnet kan betragtes som tilfredsstillende fremgår af:

- 1) at grænsebetingelserne er opfyldt,
- 2) at strømlinier og potentiallinier står vinkelret på hinanden, samt
- 3) at strømlinier og potentiallinier danner kvadrater.

KONKLUSION

Strømnettet for strømmingen under spunsvæggen er som vist på figur 4.4 C.

EKSEMPEL 4.5: Strømnet for strømning med frit grundvandspejl.

GIVET

To parallelløbende kanaler er udgravet på en lokalitet med følgende bundforhold:

Fra kote + 14,0 til kote - 10,0: Grovsilt med $h_c = 0$

Under kote - 10,0 : Fjeld

Den ene kanal har følgende karakteristika:

Skråningsanlæg : 2 : 3
 Bundkote : + 2,0
 Bundbredde : 20,0 m
 Vandspejlskote : + 9,0

Den anden kanal har følgende karakteristika:

Skråningsanlæg : 2 : 3
 Bundkote : + 8,0
 Bundbredde : 6,0 m
 Vandspejlskote : + 13,0

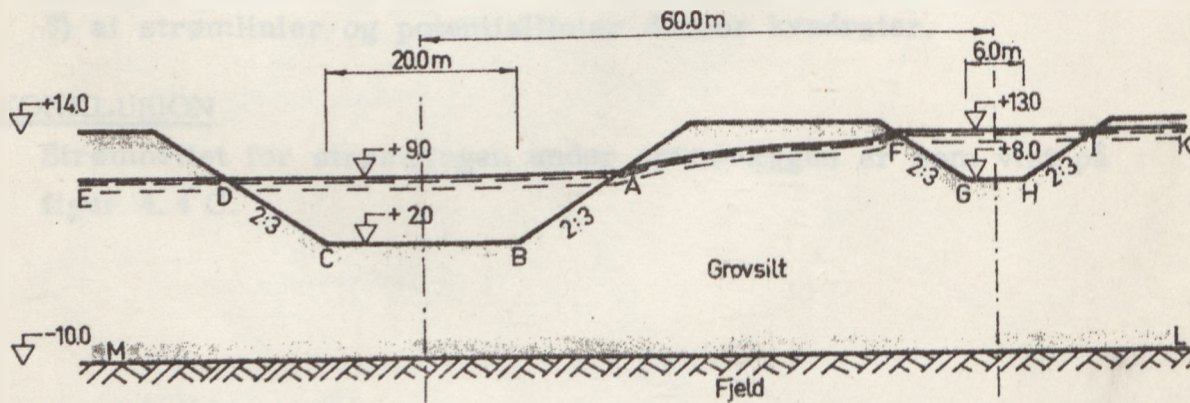
Ved at foretage henholdsvis bortledning og tilførsel er der sørget for, at vandspejlene i de to kanaler til stadighed holder sig i de ovenfor anførte niveauer.

Problemet kan betragtes som plant.

ØNSKES

Optegn strømnettet for den strømning, der opstår i grovsilt.

LØSNING



Figur 4.5 A: Snit i kanaler.

Forudsætninger

Fjeldet regnes impermeabelt i forhold til grovsilten.

Grænsebetingelser

Kanalbunden ABCD er grænsepotentiallinie, da potentialet her er konstant lig vandspejlskoten i kanalen tilvenstre på figuren.

Kanalbunden FGHI er grænsepotentiallinie, da potentialet her er konstant lig vandspejlskoten i kanalen tilhøjre på figuren.

Laggrænsen LM er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

De fri grundvandspejl AF, DE og IK er grænsestrømlinier, idet strømmingen er stationær.

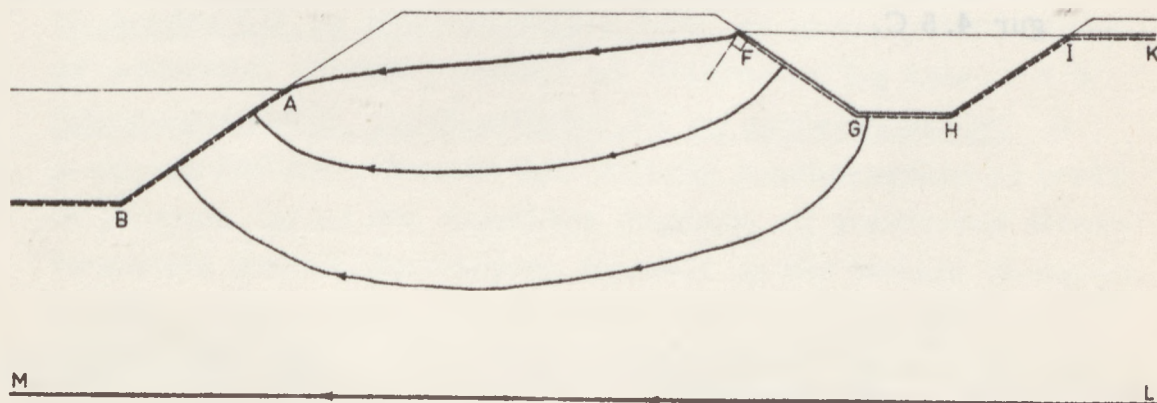
Punkterne B, C, G og H er singulære punkter, da grænsepotentiallinien her knækker.

Punkterne D, A, og I er singulære punkter, da grænsepotential- og grænsestrømlinierne her ikke står vinkelrette på hinanden.

De fri grundvandspejls beliggenhed er på forhånd ubekendt, men betingelsen om, at man på det fri grundvandspejl skal have potentialforskellen lig den geometriske højdeforskel, giver dog ved strømnettets optegning mulighed for at finde den nøjagtige beliggenhed. I den henseende er det især beliggenheden af det fri grundvandspejl AF, der har interesse, idet det umiddelbart indses, at de fri grundvandspejl DE og IK med god tilnærmelse vil være vandrette linier i henholdsvis kote + 9,0 og + 13,0.

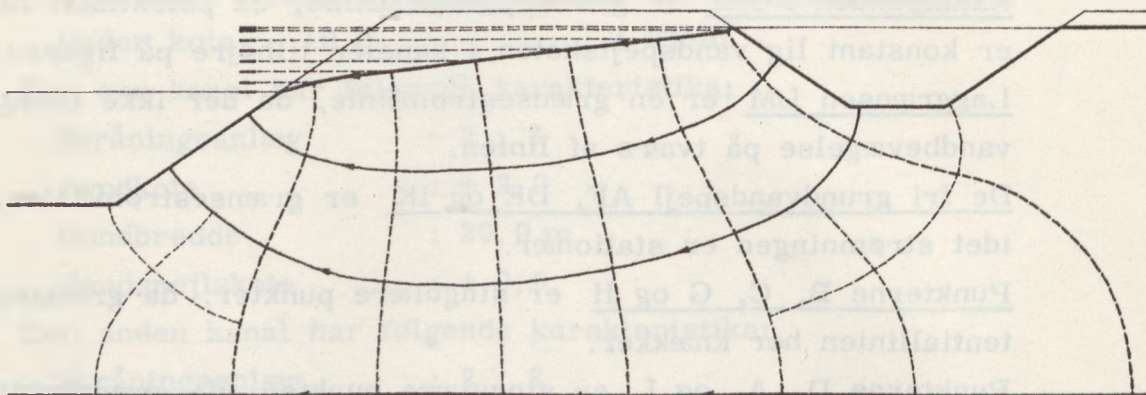
Strømnet

På fig. 4.5 B er vist grænsebetingelserne, ligesom der er foretaget en skitsering af strømniernes (herunder af det fri grundvandspejls) skønnede forløb.



Figur 4.5 B: Grænsebetingelser og skitsering af strømniernes forløb.

Ved at forsøge sig frem tegnes nu strømnettet, idet man til stadighed kontrollerer om den lodrette afstand mellem potentialliniernes skæringspunkter med det fri grundvandspejl overalt svarer til de valgte potentialspring. Det færdige resultat er vist på figur 4.5 C.



Figur 4.5 C: Det færdige strømnet.

At det viste strømnet kan betragtes som tilfredsstillende fremgår af:

- 1) at grænsebetingelserne er opfyldt, herunder at den lodrette afstand mellem potentialliniernes skæringspunkter med det fri grundvandspejl overalt svarer til det valgte potentialspring,
- 2) at strømlinier og potentiallinier står vinkelret på hinanden, samt
- 3) at strømlinier og potentiallinier danner kvadrater (bortset fra det brudne potentialspring).

KONKLUSION

Strømnettet for strømningen gennem grovsilten er som vist på figur 4.5 C.

EKSEMPEL 4.6: Strømnet for strømning med stagnationspunkt.GIVET

En dobbelt spunsvægsfangedæmning med længde $l = 200$ m skal opføres på et vanddækket areal med følgende bundforhold:

Fra kote - 8,0 til kote - 19,0: Silt med $h_c = 9,0$ m

Under kote - 19,0 : Moræneler.

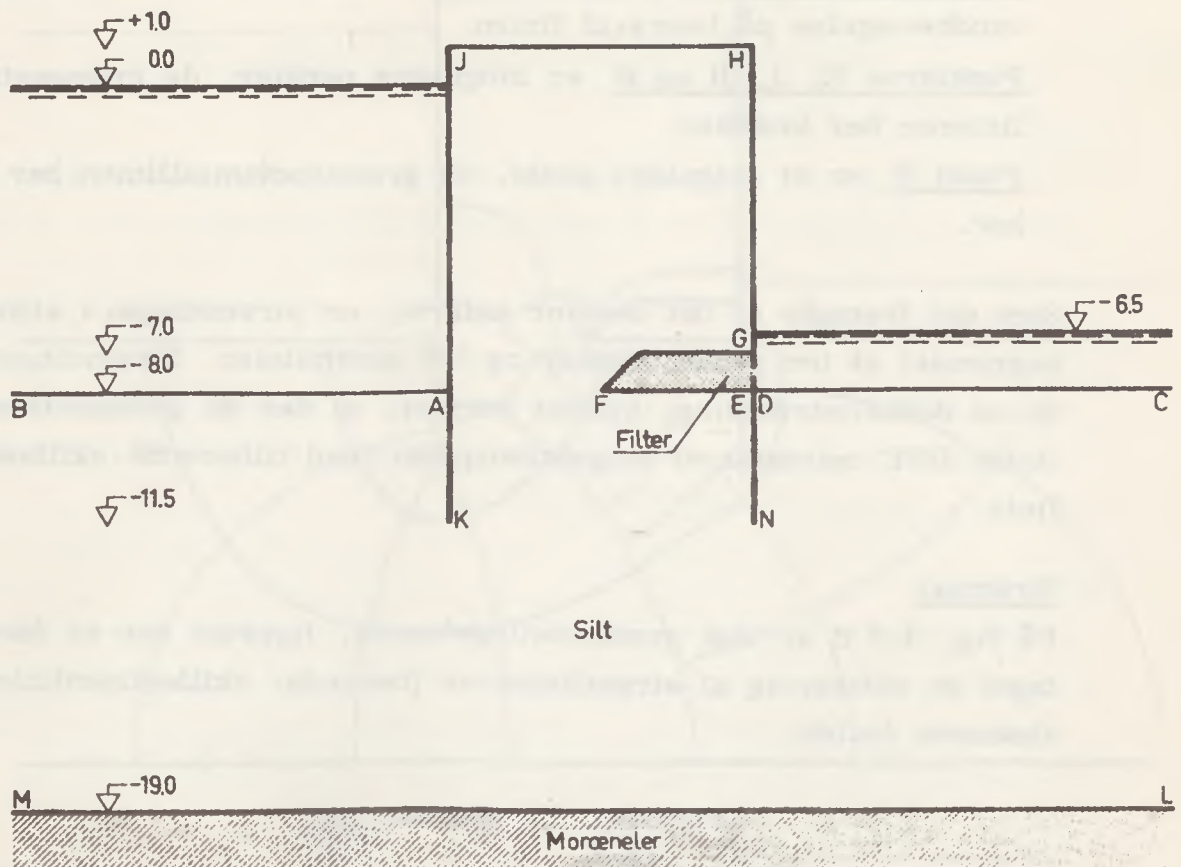
Vandspejlet på konstruktionens ene side står til stadighed i kote 0,0. På konstruktionens anden side skal vandspejlet sænkes til kote - 6,5.

De to spunsvægge, hvis indbyrdes afstand er 8,0 m, rammes begge til kote - 11,5. Fangedæmningens overside ligger i kote + 1,0. Som fyld i fangedæmningen er benyttet silt med samme egenskaber som silten in situ.

På den side af dæmningen, hvor vandspejlet skal sænkes, er i fylden placeret et filter. Filtret ligger umiddelbart op til spunsvæggen, som er forsynet med dræningshuller. Filtrets underside, som er vandret, og som er placeret i kote - 8,0, har bredden 4,0 m. Oversiden, som ligeledes er vandret, og som er placeret i kote - 7,0, har bredden 3,0 m. Mellem over- og underside er filtret begrænset af en ret linie, der danner vinklen 45° med vandret.

ØNSKES

Optegn strømnettet for strømningen i silten.

LØSNING

Figur 4.6 A: Snit i dobbelt spunsvæggsfangedæmning.

Forudsætninger

Spunsvæggene regnes tætte (med undtagelse af dræningshullerne).

Moræneleret regnes impermeabelt i forhold til silten.

Filtret regnes drænende i forhold til silten.

Problemet betragtes som plant.

Grænsebetingelser

Havbunden AB er en grænsepotentiallinie, da potentialet overalt i punkter på linien er lig kote 0,0.

Havbunden CD og filteroverfladen EFG er grænsepotentiallinier, da potentialet overalt i punkter på linierne er lig kote - 6,5.

Spunsvæggen AKJ, jordoverfladen JH og spunsvæggen HG er grænsestrømlinier, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linierne, og da den kappilære stighøjde er større end niveauforskellen mellem dæmningens toppunkt og det laveste vandspejl, således at dæmningen er vandmættet helt op til jordoverfladen.

Laggrænsen LM er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

Spunsvæggen DNE er en grænsestrømlinie, da der ikke foregår vandbevægelse på tværs af linien.

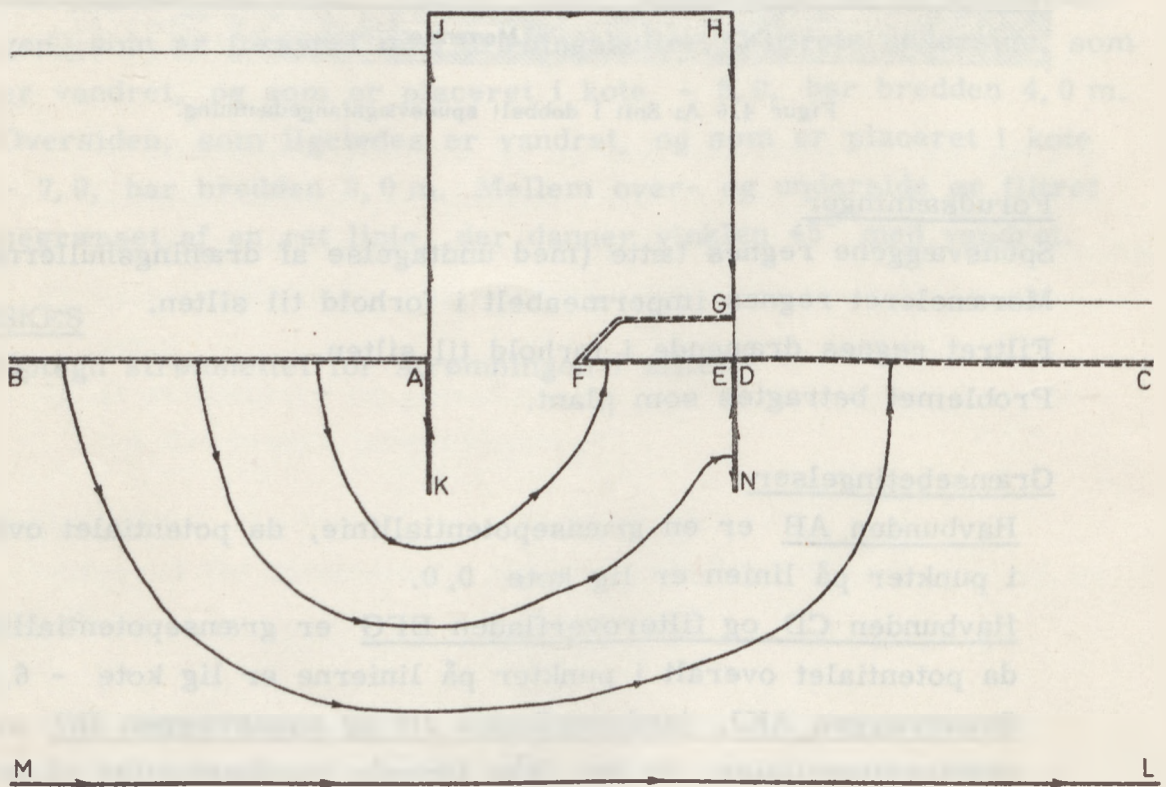
Punkterne K, J, H og N er singulære punkter, da grænsestrømlinierne her knækker.

Punkt F er et singulært punkt, da grænsepotentiallinien her knækker.

Som det fremgår af det ovenfor anførte, er strømmingen i silten begrænset af tre potentiallinier og tre strømlinier. Strømmingen er da en dobbeltstrømning, hvilket betyder, at der på grænsestrømlinien DNE optræder et stagnationspunkt med tilhørende skillestrømlinie.

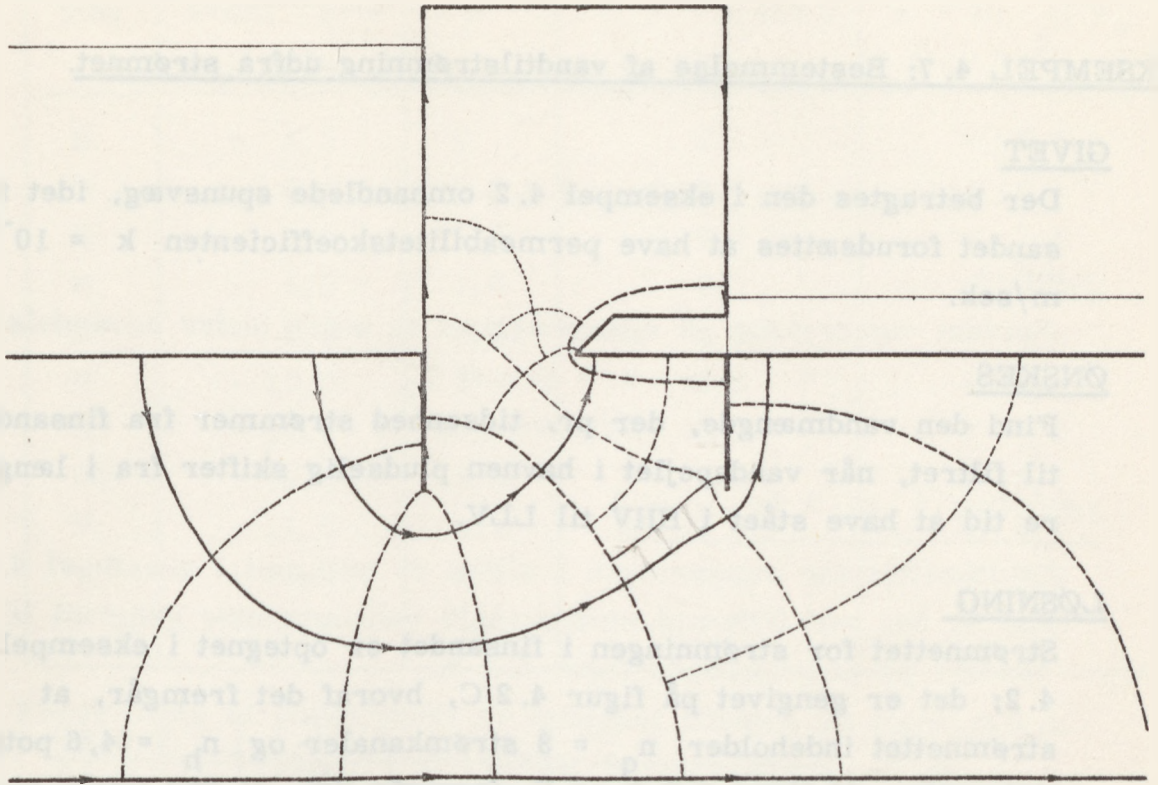
Strømnet

På fig. 4.6 B er vist grænsebetingelserne, ligesom der er foretaget en skitsering af strømliniernes (herunder skillestrømliniens) skønnede forløb.



Figur 4.6 B: Grænsebetingelser og skitsering af strømliniernes forløb.

Ved at forsøge sig frem tegnes nu strømnettet. Det færdige resultat er vist på fig. 4.6 C.



Figur 4.6 C: Det færdige strømnet.

At det viste strømnet kan betragtes som tilfredsstillende fremgår af:

- 1) at grænsebetingelserne er opfyldt,
- 2) at strømmlinier og potentiallinier står vinkelret på hinanden, samt
- 3) at strømmlinier og potentiallinier danner kvadrater (bortset fra det brudne potentialspring).

KONKLUSION

Strømnettet for strømningen gennem silten er som vist på figur 4.6 C.

EKSEMPEL 4.7: Bestemmelse af vandtilstrømning ud fra strømnet.GIVET

Der betragtes den i eksempel 4.2 omhandlede spunsvæg, idet finsandet forudsættes at have permeabilitetskoefficienten $k = 10^{-5}$ m/sek.

ØNSKES

Find den vandmængde, der pr. tidsenhed strømmer fra finsandet til filtret, når vandspejlet i havnen pludselig skifter fra i længere tid at have stået i HHV til LLV.

LØSNING

Strømnettet for strømningen i finsandet er optegnet i eksempel 4.2; det er gengivet på figur 4.2 C, hvoraf det fremgår, at strømnettet indeholder $n_q = 3$ strømkanaler og $n_h = 4,6$ potentialspring. Af figur 4.2 A og B fremgår det, at den totale potentialforskel er $h_t = 4,0$ m.

Vandmængden, der pr. tidsenhed strømmer til filtret, bliver da:

$$q = k h_t \frac{n_q}{n_h} = 10^{-5} \cdot 4 \cdot \frac{3}{4,6} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sek} = 94 \text{ l/h}$$

KONKLUSION

Lige efter vandspejlsskiftet strømmer der fra finsandet til filtret vandmængden $q = 94 \text{ l/h}$.

EKSEMPEL 4.8: Bestemmelse af porevandstryk udfra strømnetGIVET

Der betragtes den i eksempel 4.4 omhandlede spunsvæg.

ØNSKES

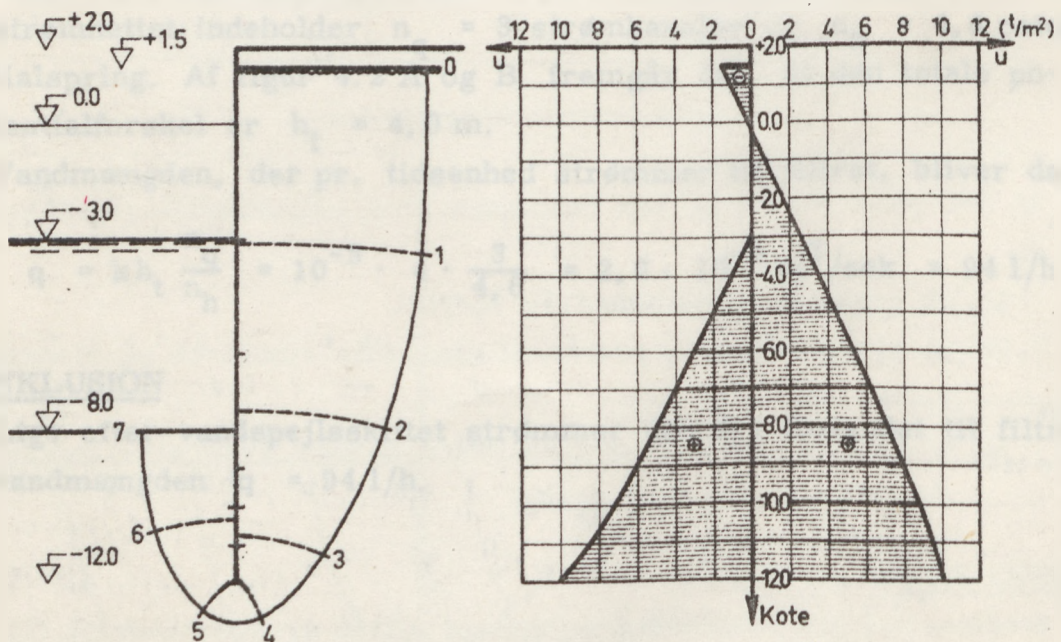
Bestem vandtrykket på spunsvæggens to sider under anvendelse af:

A. $u = (h - z) \gamma_w$

B. Stigrørsmetoden

LØSNING A ($u = (h - z) \gamma_w$)

Strømnettet for strømningen i silten er optegnet i eksempel 4.4. Det er for den inderste strømkanals vedkommende gengivet tilvenstre på nedenstående figur 4.8 A.



Figur 4.8A: Bestemmelse af porevandstryk ved $u = (h - z) \gamma_w$.

Beregningen af porevandstrykket er foretaget i omstående skema, hvor potentialer og geometriske højder er regnet ud fra kotesystemets nulniveau.

Af figur 4.8 A, samt af det i eksempel 4.4 anførte, fremgår det, at strømnettet indeholder $n_h = 7$ potentialspring, at den totale potentialforskel h_t er lig 3,0 m, samt at potentialet h_0 svarende til potentiallinie 0 er lig kote 0,0. For potentialet svarende til potentiallinie n fås da potentialet:

$$h = h_0 - \frac{n}{n_q} h_t = 0,0 - \frac{n}{7,0} 3,0 = - 0,429 n$$

Side	Punkt i kote (= z)	n	$h = - 0,429 n$	$u = (h - z) \gamma_w$ (t/m ²)
H	+ 1,5	0	0	- 1,5
H	0,0	0,3	- 0,1	- 0,1
H	- 3,0	1,0	- 0,4	+ 2,6
H	- 6,0	1,6	- 0,7	+ 5,3
H	- 9,0	2,4	- 1,0	+ 8,0
H	- 10,0	2,8	- 1,2	+ 8,8
H	- 11,0	3,2	- 1,4	+ 9,6
HV	- 12,0	4,4	- 1,9	+ 10,1
V	- 11,0	5,7	- 2,4	+ 8,6
V	- 10,0	6,2	- 2,7	+ 7,3
V	- 8,0	7,0	- 3,0	+ 5,0

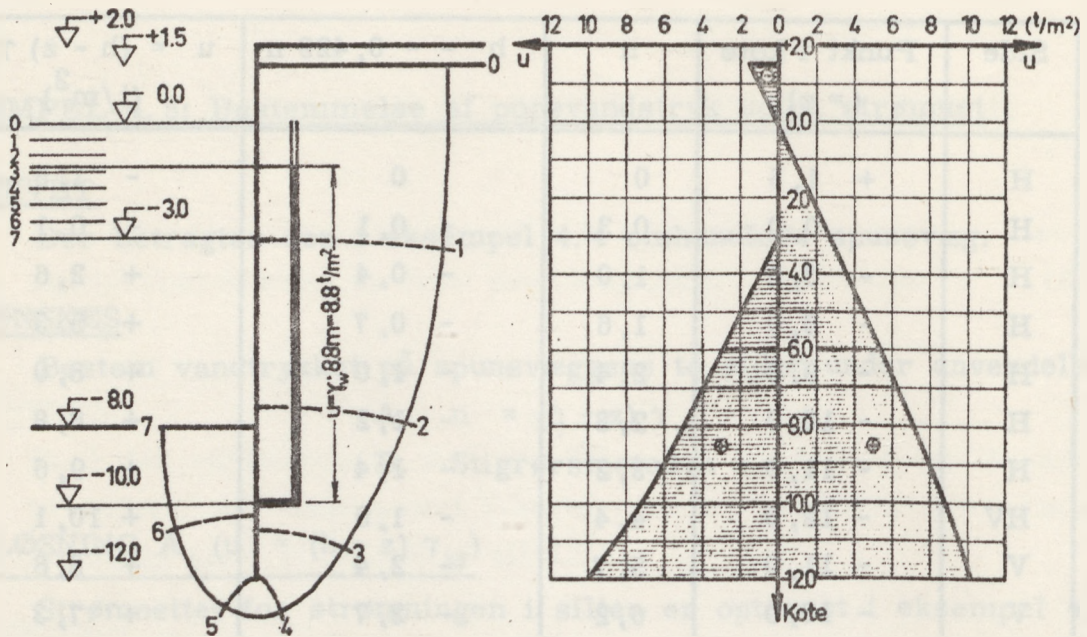
Fordelingen af poretrykket er optegnet tilhøjre på figur 4.8 A.

LØSNING B (Stigrørsmetoden)

Strømnettet for strømningen i silten er optegnet i eksempel 4.4. Det er for den inderste strømkanals vedkommende gengivet tilvenstre på figur 4.8 B.

Konstruktionen af porevandstrykfordelingen er foretaget direkte på figur 4.8 B, idet man går frem på følgende måde:

- Grænsepotentiallinien med størst potentiale benævnes med nummer 0; de øvrige 7,0 potentiallinier nummereres i overensstemmelse hermed.
- Højdeforskellen mellem de to grænsepotentialniveauer, som i henhold til det i eksempel 4.4 anførte er kote 0,0 og kote - 3,0, deles i 7,0 lige store stykker begyndende ved det højeste niveau. Inddelingen nummereres i overensstemmelse med inddelingen af potentiallinier.
- I et givet punkt findes nu poretrykket, som γ_w multipliceret med den lodrette afstand fra punktet og op til det potentialniveau, der har samme nummer som den potentiallinie, der går gennem punktet.



Figur 4.8B: Bestemmelse af porevandstryk ved stigrørsmetoden.

Tilvenstre på figur 4.8 B er vist, hvordan man i henhold til ovennævnte fremgangsmåde har fundet poretrykket på højre side af væggen i kote - 10,0 til $u = 8,8 \text{ t/m}^2$. Fordelingen af poretrykket er optegnet til højre på figur 4.8 B.

KONKLUSION

Vandtrykket på spunsvæggens to sider er som vist til højre på figurerne 4.8 A og B.

EKSEMPEL 4.9: Bestemmelse af faren for erosion udfra strømnet.GIVET

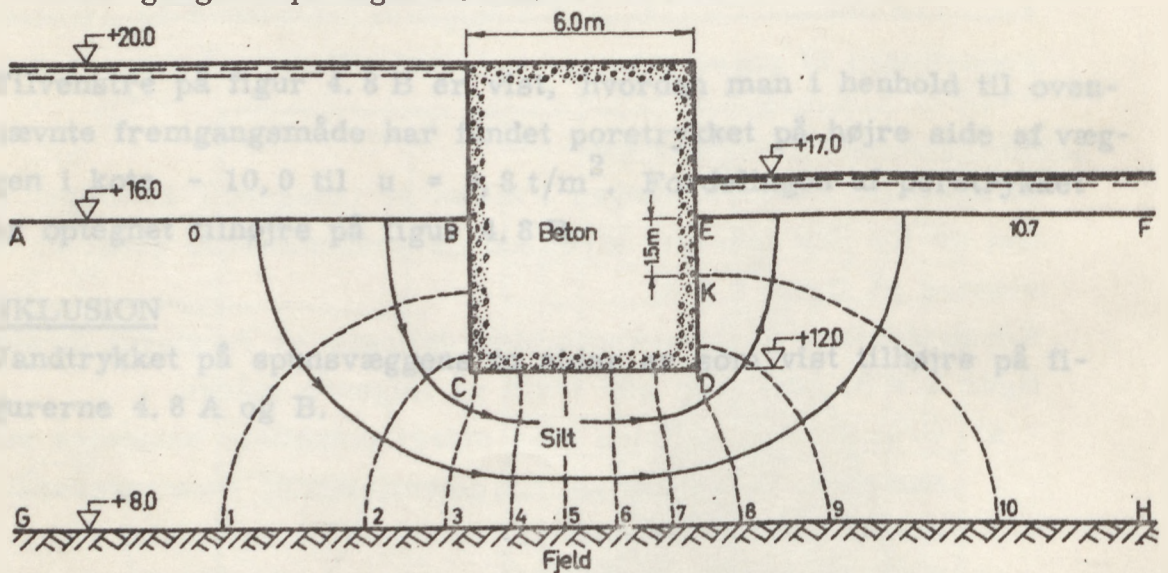
Der betragtes den i eksempel 4.3 omhandlede betondæmning, idet siltens rumvægt er $\gamma_m = 1,9 \text{ t/m}^3$.

ØNSKES

Bestem om der er tilstrækkelig sikkerhed mod, at der sker erosion i silten på dæmningens nedstrømsside.

LØSNING

Strømnettet for strømmingen i silten er optegnet i eksempel 4.3. Det er gengivet på figur 4.9 A.



Figur 4.9A: Erosion på dæmnings nedstrømsside.

Fare for erosion vil der være i punkter af siltoverfladen på dæmningens nedstrømsside. Størst fare vil der være i punkt E, idet den lodrette afstand mellem potentiallinierne her er mindst, således at man her har den største opadrettede gradient. Da der er tale om et problem, hvor nyttelast og materialegenskaber ikke har indflydelse, skal vandtryk multipliceres med partialkoefficienten 1,2.

Herved fås på siltoverfladen AB det nominelle vandtryk:

$$u_{AB} = (20,0 - 16,0) 1,0 \cdot 1,2 = 4,8 \text{ t/m}^2$$

medens man på siltoverfladen EF får det tilsvarende nominelle vandtryk:

$$u_{EF} = (17,0 - 16,0) 1,0 \cdot 1,2 = 1,2 \text{ t/m}^2$$

Den totale nominelle potentialforskel bliver da, idet grænsepotentiallinierne AB og EF ligger i samme niveau:

$$h_t = u_{AB} - u_{EF} = 4,8 - 1,2 = 3,6 \text{ t/m}^2$$

Som det fremgår af figur 4.9 A indeholder strømnettet ialt 10,7 potentialspring. Pr. potentialspring fås da potentialfaldet:

$$\frac{3,6}{10,7} = 0,34 \text{ m}$$

På strækningen KE, som har længden $\Delta s = 1,5 \text{ m}$, fås den opadrettede gradient:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta s} = \frac{0,7 \cdot 0,34}{1,5} = 0,16$$

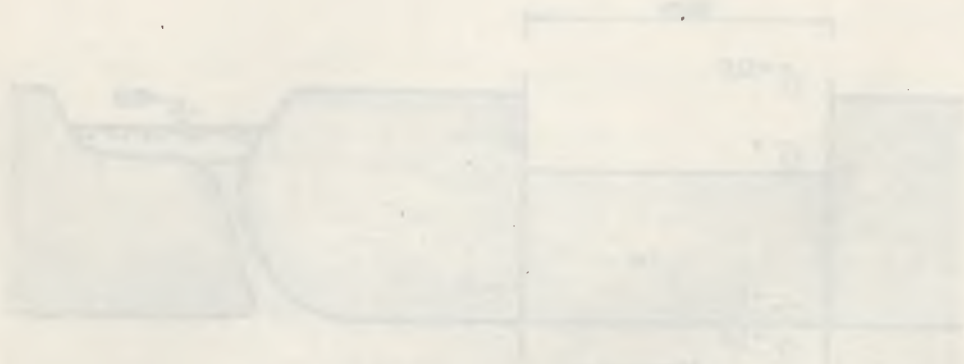
Da

$$\begin{aligned} i \gamma_w &= 0,16 \cdot 1,0 = 0,16 \text{ t/m}^3 < \gamma' = \gamma_m - \gamma_w \\ &= 1,9 - 1,0 = 0,9 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

er der tilstrækkelig sikkerhed mod erosion i silten.

KONKLUSION

Der er tilstrækkelig sikkerhed mod, at der sker erosion på dæmningsens nedstrømsside.



EKSEMPEL 4.10: Bestemmelse af faren for løftning af byggegrubes bund GIVET

En 100 m lang og 8 m bred byggegrube skal etableres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF i kote + 12,0.

Fra kote + 12,0 til kote + 6,0: Ler med $\gamma_m = 1,8 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 8 \text{ m}$

Under kote + 6,0 : Morænegrus

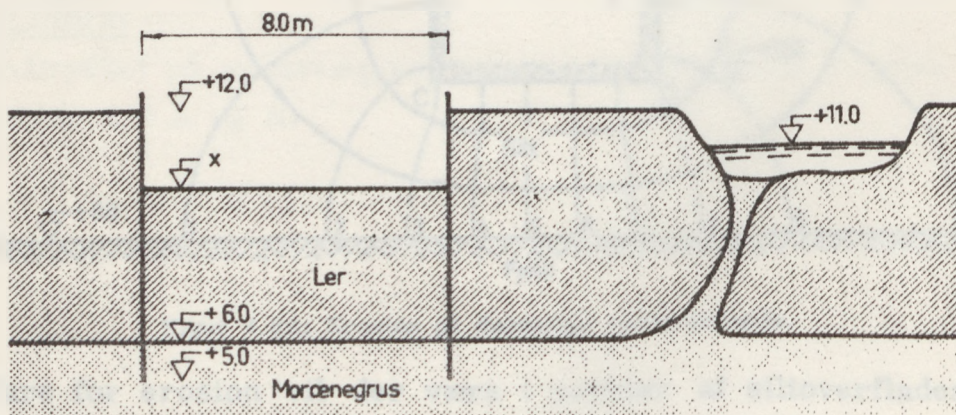
Porevandet i morænegruset står i direkte forbindelse med vandet i en sø, hvis vandspejl til stadighed står i kote + 11,0.

Som indfatning for byggegruben rammes en afstivet spunsvæg.

Væggen rammes til kote + 5,0.

 ØNSKES

Bestem det niveau, hvortil der kan udgraves med tilstrækkelig sikkerhed mod løftning af byggegrubens bund.

 LØSNING

Figur 4.10A: Løftning af byggegrubes bund.

 Forudsætninger

Der ses bort fra friktions- og adhæsiionskræfterne mellem leret og spunsvæggene.

 Beregninger

Når der er gravet ud til kote x virker der i byggegruben i kote + 6,0 den lodrette totale spænding:

$$\sigma = (x - 6,0) \gamma_m = (x - 6,0) 1,8 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

Niveauforskellen mellem lerets underside og søens vandspejl er $11,0 - 6,0 = 5,0$ m. På lerlagets underside virker følgelig det opadrettede aktuelle vandtryk $5,0 \text{ t/m}^2$. Da der er tale om et problem, hvor nyttelast og materialeegenskaber ikke har indflydelse, skal dette vandtryk multipliceres med partialkoefficienten $f_w = 1,2$. Man får da på lerlagets underside det opadrettede nominelle vandtryk:

$$u_n = 5,0 \cdot 1,2 = 6,0 \text{ t/m}^2.$$

Den lodrette ligevægtsbetingelse for leret kræver nu:

$$\sigma = (x - 6,0) 1,8 \geq u_n = 6,0$$

Heraf fås:

$$x \geq 9,3$$

KONKLUSION

Der kan netop udgraves til kote + 9,3 med tilstrækkelig sikkerhed mod løftning af byggegrubens bund.



EKSEMPEL 5.1: Bestemmelse af dekadehældningen for normaltconsolideret lerGIVET

På en aflejring af moseler, der i geologisk henseende må betegnes som siltrig, dyndet, postglacial og sandsynligvis normaltconsolideret, skal udlægges en vejdæmning.

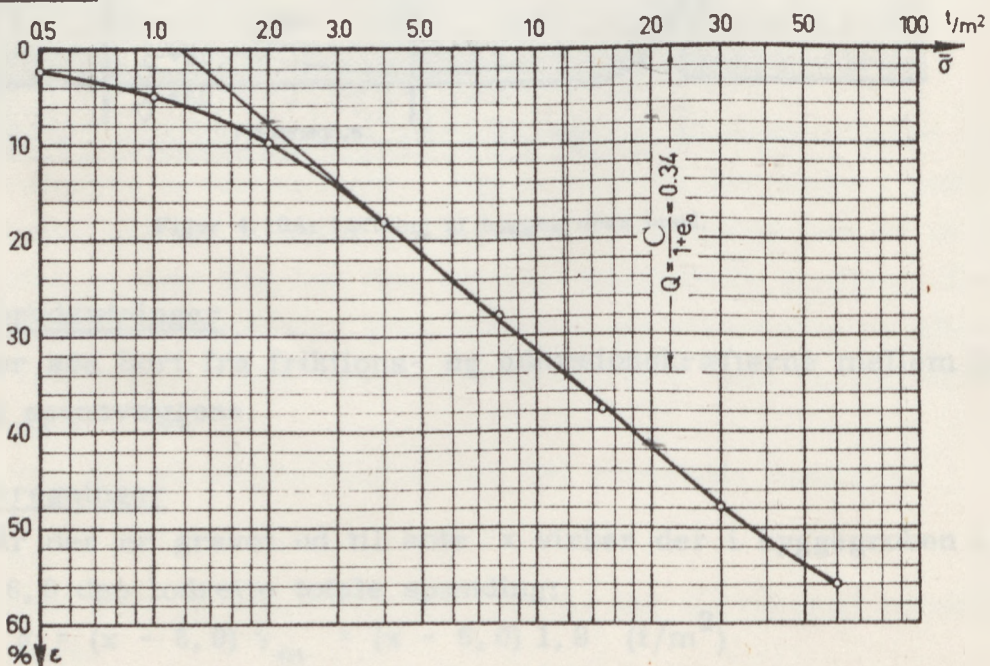
Med henblik på undersøgelse af dæmningens sætninger er fra lerlaget optaget en prøve, som i laboratoriet er underkastet et konsolideringsforsøg.

Prøven, der in situ har været underkastet den lodrette effektive spænding $\bar{\sigma} = 1,3 \text{ t/m}^2$, og som hidrørende fra dæmningen må påregnes at blive underkastet den lodrette effektive tillægsspænding $\Delta\bar{\sigma} = 9 \text{ t/m}^2$, blev under konsolideringsforsøget belastet i en geometrisk følge af belastningstrin indtil 60 t/m^2 . Under forsøget blev målt følgende sammenhæng mellem belastning og porretal (deformation):

$\bar{\sigma}$ (t/m^2)	0	0,5	1,0	2	4	8	15	30	60
e	3,360	3,275	3,171	3,007	2,735	2,407	2,071	1,735	1,460

ØNSKES

Bestem den dekadehældning $Q = \frac{C}{1 + e_0}$, der skal anvendes ved en beregning af vejdæmningens sætninger.

LØSNING

Figur 5.1A: Konsolideringsdiagram for normaltconsolideret ler.

På figur 5.1 A er optegnet konsolideringsdiagrammet (arbejdskurven) for prøven, idet belastningerne er afsat i logaritmisk målestok medens deformationerne er afsat i aritmetrisk målestok. Deformationerne er afsat i procent af prøvens oprindelige tykkelse, idet der ved omregningen, som er vist i vedstående skema, er benyttet formlen:

$$d\epsilon = d \frac{\Delta h}{h} = \frac{de}{1 + e_0}$$

hvor e_0 er prøvens begyndelsesporotal.

Belastningstrin $\bar{\sigma}$ (t/m ²)	e	de	$d\epsilon = \frac{de}{1 + e_0}$	$\epsilon = \frac{\Delta h}{h}$
0	3,360			0
0,5	3,275	0,085	0,022	0,022
1	3,171	0,104	0,028	0,050
2	3,007	0,164	0,049	0,099
4	2,735	0,272	0,081	0,180
8	2,407	0,328	0,098	0,278
15	2,071	0,336	0,100	0,378
30	1,735	0,336	0,100	0,478
60	1,460	0,275	0,082	0,560

På figur 5.1A er vist, hvorledes konsolideringskurvens stamkurve tegnes som tangent til konsolideringskurvens retliniede del. Da leret er normalt konsolideret, er det denne stamkurve, der skal benyttes ved sætningsberegningen.

På figur 5.1A er endvidere vist, hvordan stamkurvens dekadehældning findes som den deformation, der svarer til en tidobling af spændingen.

Det ses, at man for det aktuelle problem skal anvende dekadehældningen

$$Q = \frac{C}{1 + e_0} = 0,34.$$

KONKLUSION

Ved beregning af vejdæmningens konsolideringssætning skal anvendes dekadehældningen

$$Q = \frac{C}{1 + e_0} = 0,34.$$

EKSEMPEL 5.2: Bestemmelse af konsolideringsmodulen for forkonsolideret ler.

GIVET

På en aflejring af moræneler, der kan betragtes som forkonsolideret under isens tryk, skal placeres et fundament for en varmekedel til et el-værk.

Med henblik på undersøgelse af fundamentets sætninger er fra lerlaget optaget en prøve, som i laboratoriet er underkastet et konsolideringsforsøg.

Prøven, der in situ har været underkastet den lodrette effektive spænding $\bar{\sigma} = 8 \text{ t/m}^2$, og som hidrørende fra fundamentet må påregnes at blive underkastet den lodrette effektive tillægsspænding $\Delta\bar{\sigma} = 20 \text{ t/m}^2$, blev under konsolideringsforsøget udsat for følgende belastningscyklus:

- Først belastning i geometrisk følge af belastningstrin indtil 500 t/m^2 .
- Dernæst aflastning i to aflastningstrin til 4 t/m^2 .
- Sluttelig genbelastning i geometrisk følge af belastningstrin indtil 120 t/m^2 .

Under forsøget blev målt følgende sammenhæng mellem belastning og deformation:

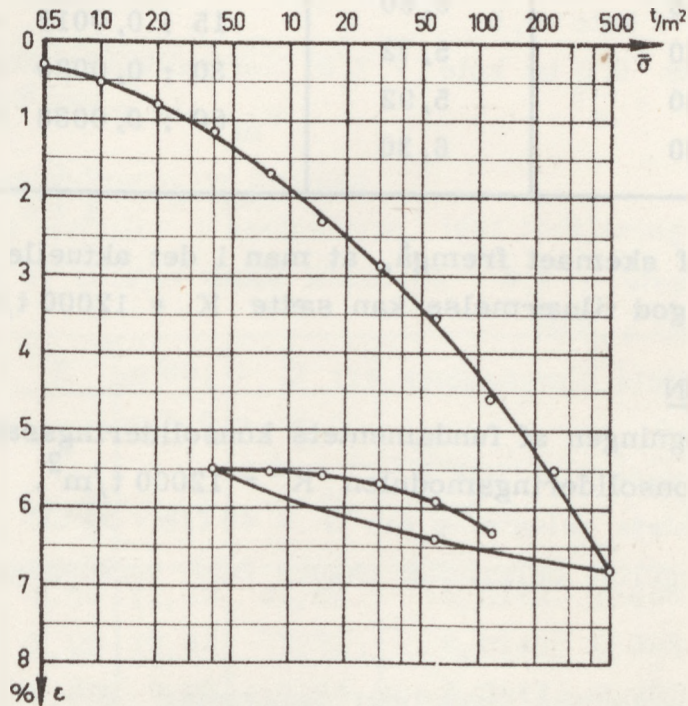
Belastning		Aflastning		Genbelastning	
$\bar{\sigma}$ (t/m^2)	$\Delta h/h$ ($^{\circ}/o$)	$\bar{\sigma}$ (t/m^2)	$\Delta h/h$ ($^{\circ}/o$)	$\bar{\sigma}$ (t/m^2)	$\Delta h/h$ ($^{\circ}/o$)
0	0				
0,5	0,30				
1	0,51				
2	0,80				
4	1,15	4	5,50	4	5,50
8	1,70			8	5,54
15	2,30			15	5,60
30	2,91			30	5,72
60	3,54	60	6,41	60	5,92
120	4,60			120	6,30
250	5,50				
500	6,80	500	6,80		

ØNSKES

Bestem den konsolideringsmodul K , der skal anvendes ved en beregning af fundamentets konsolideringssætninger.

LØSNING

På figur 5.2A er optegnet konsolideringsdiagrammet (arbejdskurven) for prøven, idet belastningerne er afsat i logaritmisk målestok, medens deformationerne er afsat i aritmetrisk målestok.



Figur 5.2A: Konsolideringsdiagram for forkonsolideret ler.

Da prøven har været forbelastet under isens tryk, skal ved sætningsberegningen anvendes genbelastningsgrenen. Da opførelsen af fundamentet øger de lodrette effektive spændinger i jorden fra 8 til 28 t/m^2 , skal den konsolideringsmodul, der skal anvendes ved sætningsberegningen, findes af de to belastningstrin $8 - 15 \text{ t/m}^2$ og $15 - 30 \text{ t/m}^2$.

I omstående skema er beregnet konsolideringsmodulen for de forskellige trin af genbelastningsgrenen.

Genbelastning		
$\bar{\sigma}$ (t/m ²)	$\frac{\Delta h}{h}$ (°/o)	$K = d\bar{\sigma} : d\frac{\Delta h}{h}$ (t/m ²)
4	5,50	4 : 0,0004 = 10000
8	5,54	7 : 0,0006 = 11700
15	5,60	15 : 0,0012 = 12500
30	5,72	30 : 0,0020 = 15000
60	5,92	60 : 0,0038 = 15800
120	6,30	

Det vil af skemaet fremgå, at man i det aktuelle belastningsinterval med god tilnærmelse kan sætte $K = 12000 \text{ t/m}^2$.

KONKLUSION

Ved beregningen af fundamentets konsolideringssætning skal anvendes konsolideringsmodulen $K = 12000 \text{ t/m}^2$.

EKSEMPEL 5.3: Konsolideringssætning af stribefundament på normalt-konsolideret ler.

GIVET

Et stribefundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote 0,0.

Fra kote 0,0 til kote - 7,0: Normaltkonsolideret ler med

$\gamma_m = 2,0 \text{ t/m}^3$ og dekadehæld-

ning $Q = \frac{C}{1 + e_0} = 0,0143$

Under kote - 7,0 : Sand

GVS står i JOF.

Fundamentets dimensioner er: $L = 100 \text{ m}$, $B = 2,0 \text{ m}$ og $h = 0,8 \text{ m}$.

FUK er placeret i JOF.

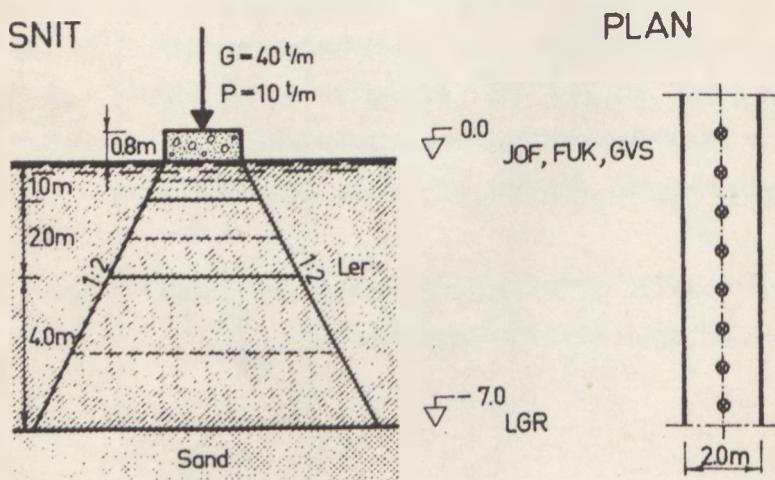
Fundamentets belastning er: $G = 40 \text{ t/m}$ og $P = 10 \text{ t/m}$.

Den bevægelige belastning regnes fuldt sætningsgivende.

ØNSKES

Find fundamentets konsolideringssætning δ_c .

LØSNING



Figur 5.3A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

$$\text{Sætningen beregnes af } \delta_c = \sum \frac{C}{1 + e_o} \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta \bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_a} \right) \cdot \Delta z$$

Der regnes med trykspredning under 1 : 2.

Problemet betragtes som plant.

Belastning på fundamentsflade

$$\text{Belastning på fundament: } 40 + 10 = 50,0 \text{ t/m}$$

$$\text{Egenvægt af fundament : } 2,0 \cdot 0,8 \cdot 2,3 = \underline{3,7 \text{ t/m}}$$

$$\text{Sætningsgivende last : } V_s = 53,7 \text{ t/m}$$

Beregning af spændinger og sætning

Beregningerne opstilles i skemaform, idet forklaringen til de enkelte kolonner er tilføjet under skemaet.

1	2	3	4	5	6	7
Δz m	z m	σ_a t/m ²	$\Delta \bar{\sigma}_1$ t/m ²	$1 + \frac{\Delta \bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_a}$	$\frac{C}{1 + e_o} \log \left(1 + \frac{\Delta \bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_a} \right) \cdot \Delta z$ cm	$\Delta \delta_c$ cm
1,00	0,50	0,50	21,50	44,00	$0,0143 \cdot 1,643 \cdot 100$	2,35
2,00	2,00	2,00	13,44	7,72	$0,0143 \cdot 0,888 \cdot 200$	2,54
4,00	5,00	5,00	7,68	2,54	$0,0143 \cdot 0,405 \cdot 400$	2,32
						7,21

ad 1: Lerlaget deles i tre lag med tykkelser Δz svarende til $B/2$, B og $2B$.

ad 2: z angiver afstanden fra FUK til midten af det pågældende lag.

ad 3: Spændingen i midten af laget før belastningens påførelse beregnes af:

$$\bar{\sigma}_a = \sum \bar{\gamma} d$$

ad 4: Tillægsspændingen beregnes under forudsætning af trykspredning under 1 : 2, dvs. efter formlen:

$$\Delta \bar{\sigma}_1 = \frac{V_s}{B + z}$$

ad 7: $\Delta \delta_c$ angiver konsolideringssætningen af det enkelte lag.

KONKLUSION

Fundamentets konsolideringssætning bliver $\delta_c = 7 \text{ cm}$.

EKSEMPEL 5.4: Konsolideringssætning af enkeltfundament på forkonsolideret ler.

GIVET

Et enkeltfundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote 2,0.

Fra kote 2,0 til kote 0,0: Fyld med $\gamma = 1,6 \text{ t/m}^3$,
 $\gamma_m = 1,8 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 0$.

Fra kote 0,0 til kote - 6,6: Forkonsolideret ler med
 $\gamma_m = 2,2 \text{ t/m}^3$.
 I belastningsintervallet 3 - 30 t/m^2
 har leret konsolideringsmodulen
 $K = 1000 \text{ t/m}^2$ før genbelastning.

Under kote - 6,6 : Sand

GVS står i kote + 0,5.

Fundamentets dimensioner er: $L = 3,0 \text{ m}$, $B = 1,5 \text{ m}$ og
 $h = 2,0 \text{ m}$.

FUK er placeret i kote 0,0.

Fundamentets belastning er: $G = 120 \text{ t}$ og $P = 30 \text{ t}$.

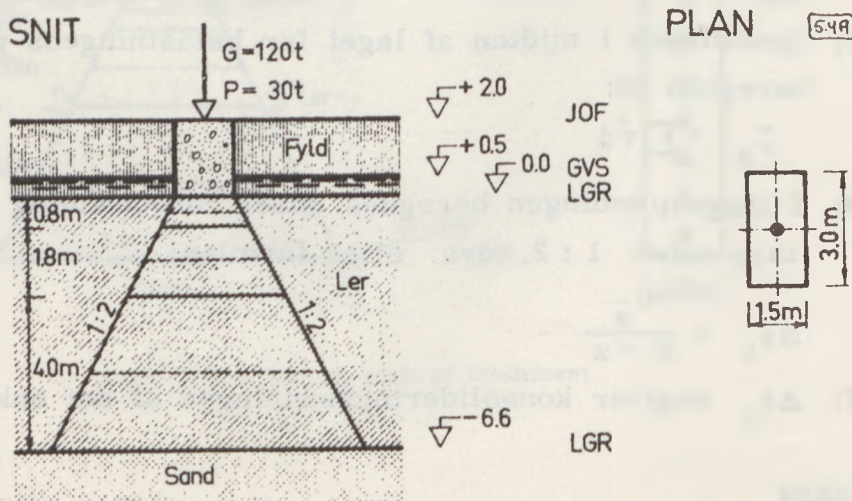
Den bevægelige belastning regnes fuldt sætningsgivende.

Lerlaget regnes færdigkonsolideret for belastningen fra fyldlaget.

ØNSKES

Find fundamentets konsolideringssætning δ_c .

LØSNING



Figur 5.4A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Sætningen beregnes af $\delta_c = \sum \frac{\Delta \bar{\sigma}_1}{K} \Delta z$.

Der regnes med trykspredning under 1 : 2.

Belastning på fundamentsflade

Belastning på fundament: 120 + 30 = 150,0 t

Egenvægt af fundament : 1,5 · 1,5 · 3,0 · 2,3
+ 0,5 · 1,5 · 3,0 · 1,3 = 18,5 t

Vægt af bortgravet jord : 1,5 · 1,5 · 3,0 · 1,6 = 168,5 t
+ 0,5 · 1,5 · 3,0 · 0,8 = 12,6 t

Sætningsgivende last : $V_s = 155,9$ t

Beregning af spændinger og sætning

Beregningerne opstilles i skemaform, idet forklaringen til de enkelte kolonner er tilføjet under skemaet.

1	2	3	4	5	6	7
Δz	z	$\bar{\sigma}_a$	$\Delta \bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_b$	$\Delta \bar{\sigma}_1 \cdot \Delta z : K$	$\Delta \delta_c$
m	m	t/m ²	t/m ²	t/m ²	cm	cm
0,80	0,40	3,28	24,15	27,43	$24,15 \cdot 0,80 : 10^3$	1,93
1,80	1,70	4,84	10,37	15,21	$10,35 \cdot 1,80 : 10^3$	1,86
4,00	4,60	8,32	3,36	11,68	$3,36 \cdot 4,00 : 10^3$	1,34
						5,13

ad 1: Lerlaget deles i tre lag med tykkelser Δz svarende til $B/2$, B og $2B$.

ad 2: z angiver afstanden fra FUK til midten af det pågældende lag.

ad 3: Spændingen i midten af laget før belastningens påførelse beregnes af:

$$\bar{\sigma}_a = \sum \bar{\gamma} d$$

ad 4: Tillægsspændingen beregnes under forudsætning af trykspredning under 1 : 2, dvs. efter formlen:

$$\Delta \bar{\sigma}_1 = \frac{V_s}{(B + z)(L + z)}$$

ad 5: Det ses, at spændingerne $\bar{\sigma}_a$ og $\bar{\sigma}_b$ ligger i konsolideringsmodulens gyldighedsområde ($3 - 30$ t/m²).

ad 7: $\Delta \delta_c$ angiver konsolideringssætningen af det enkelte lag.

KONKLUSION

Fundamentets konsolideringssætning bliver $\delta_c = 5$ cm.

EKSEMPEL 5.5: Konsolideringssætning af enkeltfundament på lagdelt jord.GIVET

Et enkeltfundament er placeret på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 1,0.

Fra kote + 1,0 til kote + 0,5: Fyld med $\gamma = 1,6 \text{ t/m}^3$ og $h_c = 0$.

Fra kote + 0,5 til kote - 7,0: Normaltkonsolideret ler med $\gamma_m = 2,0 \text{ t/m}^3$ og konsolideringsegenskaber, som vist på konsolideringsdiagrammet, figur 5.5A.

Fra kote - 7,0 til kote - 13,0: Forkonsolideret ler med $\gamma_m = 2,2 \text{ t/m}^3$ og konsolideringsegenskaber, som vist på konsolideringsdiagrammet, figur 5.5A.

Under kote - 13,0 : Sand

GVS står i kote + 0,5.

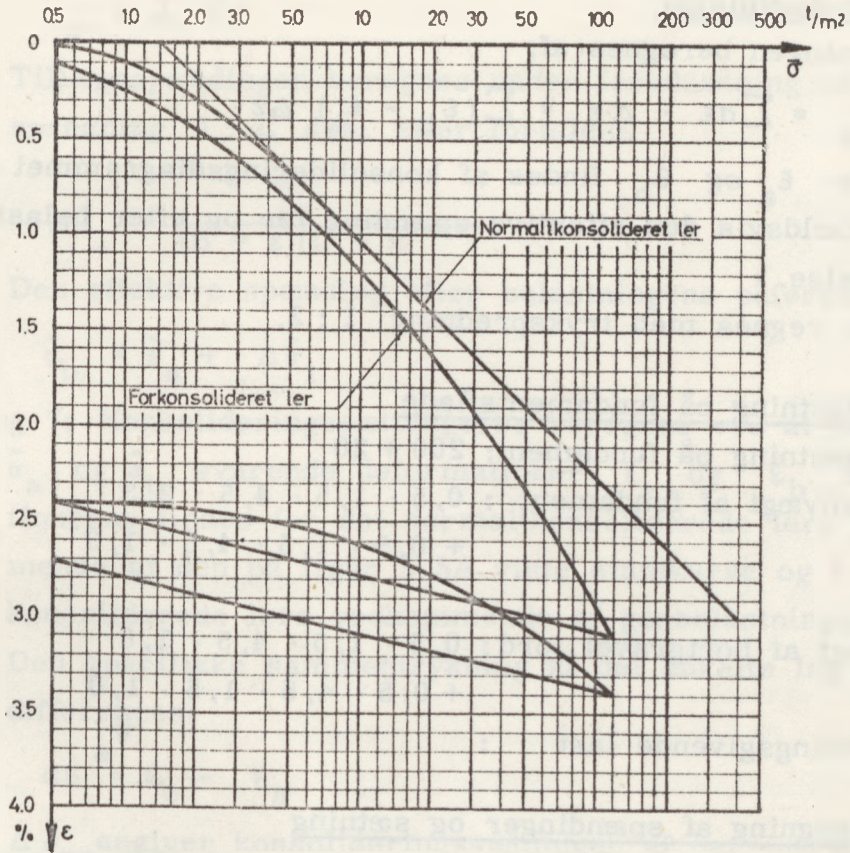
Fundamentets dimensioner er: $L = 4,5 \text{ m}$, $B = 1,5 \text{ m}$ og $h = 1,0 \text{ m}$.

FUK er placeret i kote 0,0.

Fundamentets belastning er: $G = 200 \text{ t}$ og $P = 20 \text{ t}$.

Den bevægelige belastning regnes fuldt sætningsgivende.

Lerlagene regnes færdigkonsolideret for belastningen fra fyldlaget.

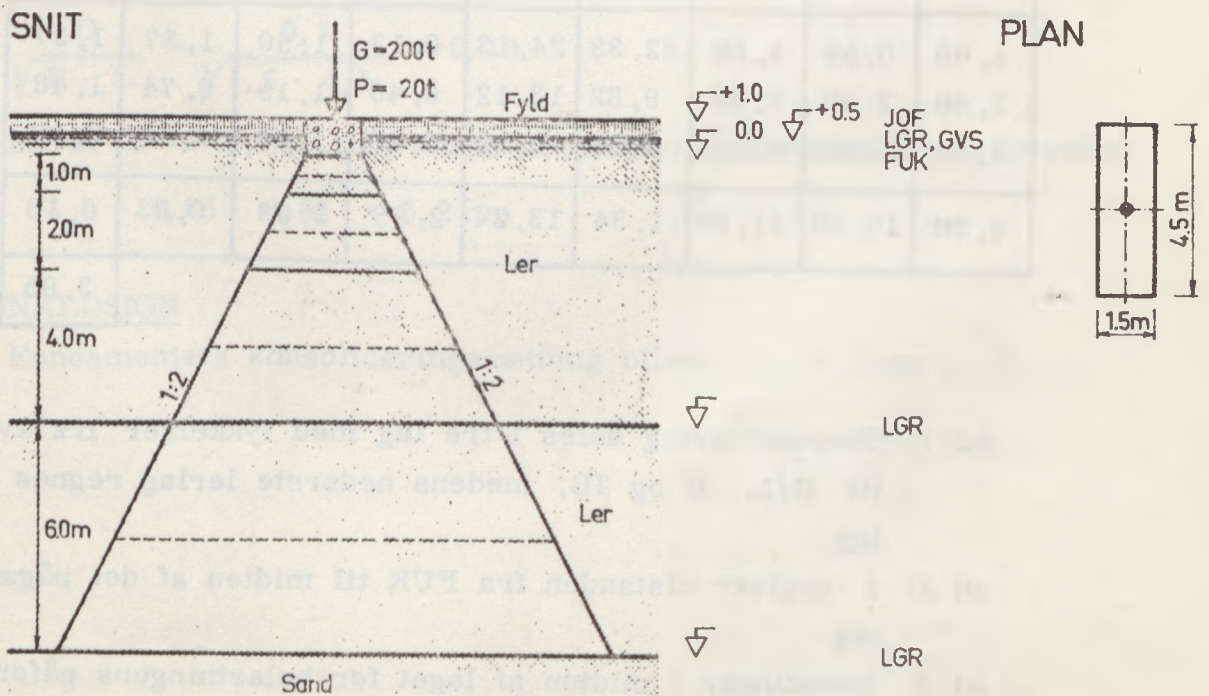


Figur 5.5A: Konsolideringsdiagram for normalt- og forkonsolideret ler.

ØNSKES

Find fundamentets konsolideringssætning δ_c .

LØSNING



Figur 5.5B: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Sætningen beregnes af:

$$\delta_c = \sum d\varepsilon \cdot \Delta z = \sum (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \cdot \Delta z$$

hvor ε_a og ε_b findes af konsolideringsdiagrammet svarende til henholdsvis den effektive spænding før og efter belastningens påførelse.

Der regnes med trykspredning 1 : 2.

Belastning på fundamentsflade

Belastning på fundament:	200 + 20	= 220,0 t
Egenvægt af fundament :	0,5 · 1,5 · 4,5 · 2,3 + 0,5 · 1,5 · 4,5 · 1,3	= 12,1 t
		<u>232,1 t</u>
Vægt af bortgravet jord:	0,5 · 1,5 · 4,5 · 1,6 + 0,5 · 4,5 · 1,5 · 1,0	= 8,8 t
Sætningsgivende last :	V_s	= 223,3 t

Beregning af spændinger og sætning

Beregningerne opstilles i skemaform, idet forklaringen til de enkelte kolonner er tilføjet under skemaet.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δz	z	$\bar{\sigma}_a$	$\Delta \bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_b$	ε_a	ε_b	dε	$\Delta \delta_c$
m	m	t/m ²	t/m ²	t/m ²	o/o	o/o	o/o	cm
1,00	0,50	1,80	22,33	24,13	0,13	1,50	1,37	1,37
2,00	2,00	3,30	9,82	13,12	0,45	1,19	0,74	1,48
4,00	5,00	6,30	3,62	9,92	0,80	1,03	0,23	0,92
6,00	10,00	11,90	1,34	13,24	2,65	2,68	0,03	0,18
								<u>3,95</u>

- ad 1: Øverste lerlag deles i tre lag med tykkelser Δz svarende til B/2, B og 2B, medens nederste lerlag regnes som et lag.
- ad 2: z angiver afstanden fra FUK til midten af det pågældende lag.
- ad 3: Spændingen i midten af laget før belastningens påførelse beregnes af:

$$\bar{\sigma}_a = \sum \bar{\gamma} d$$

ad 4: Tillægsspændingen beregnes under forudsætning af trykspredning 1 : 2, dvs. efter formlen:

$$\Delta \bar{\sigma}_1 = \frac{V_s}{(B + z)(L + z)}$$

ad 5: Den effektive spænding efter belastningens påførelse bliver:

$$\bar{\sigma}_b = \bar{\sigma}_a + \Delta \bar{\sigma}_1$$

ad 6 og 7: Konsolideringssætningerne beregnes ved at finde de til $\bar{\sigma}_a$ og $\bar{\sigma}_b$ svarende deformationer ϵ_a og ϵ_b . Deformationerne findes for det normalt konsoliderede lers vedkommende af den på figur 5.5A viste stamkurve og for det for konsoliderede lers vedkommende af genbelastningsgrenen.

ad 8: Den specifikke sammentrykning af det enkelte lag fås som differencen:

$$d\epsilon = \epsilon_b - \epsilon_a$$

ad 9: $\Delta \delta_c$ angiver konsolideringssætningen af det enkelte lag.

Fundamentets totale konsolideringssætning

Da fundamentet er funderet under JOF med en effektiv funderingsdybde $D = 0,5$ m, kan den beregnede konsolideringssætning reduceres.

Reduktionsfaktorer svarende til forholdet:

$$\sqrt{\frac{D}{B \cdot L}} = \sqrt{\frac{0,5}{1,5 \cdot 4,5}} = 0,19$$

bliver $\beta = 0,81$. Den totale konsolideringssætning bliver følgende:

$$\delta_c = 3,95 \cdot 0,81 = 3,2 \text{ cm}$$

KONKLUSION

Fundamentets konsolideringssætning bliver $\delta_c = 3$ cm.

EKSEMPEL 5.6: Konsolideringens tidsforløbGIVET

Et pladefundament af jernbeton skal placeres på en lokalitet med følgende jordbundsforhold:

JOF er i kote + 4,0.

Fra kote + 4,0 til kote + 0,0: Fedt, tertiært ler.

Under kote + 0,0 : Kridt.

GVS er i kote + 4,0.

Fundamentsfladens dimensioner er $B \cdot L = 8,0 \cdot 8,0 \text{ m}^2$. Fundamentsfladens sætningsgivende belastning er $V_s = 96 \text{ t}$.

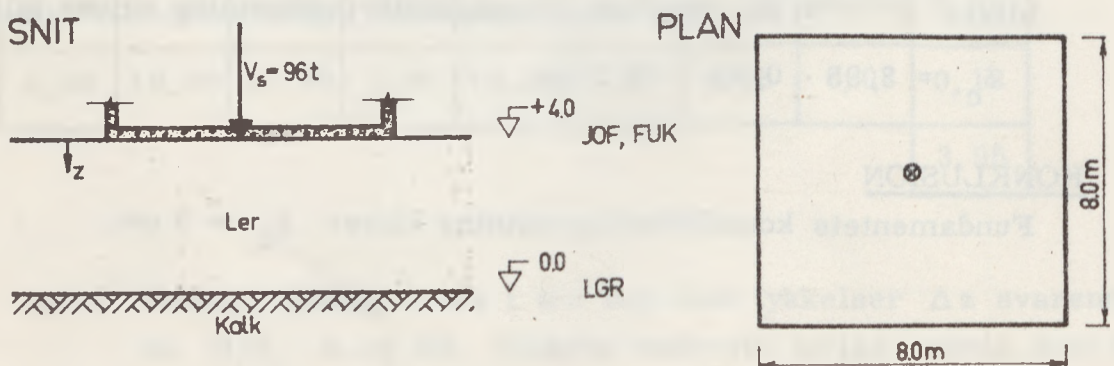
Med en prøve af det tertiære ler er udført et konsolideringsforsøg, hvor prøven, der var 2 cm høj og dobbeltsidigt drænet i belastningstrinnet $2 - 4 \text{ t/m}^2$, deformeredes i henhold til følgende sammenhæng mellem tid og poretal:

t (min.)	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	4	8
e	0,7234	0,7226	0,7223	0,7221	0,7218	0,7210	0,7201	0,7188	0,7168
t (min.)	16	30	60	120	240	480	960	1920	
e	0,7244	0,7121	0,7096	0,7074	0,7066	0,7064	0,7062	0,7062	

0,7144

ØNSKES

Bestem fundamentets konsolideringssætning svarende til tidspunktet $t = 1$ måned efter belastningens påførelse.

LØSNING

Figur 5.6A: Pladefundament på ler.

Forudsætninger

Der regnes med trykspredning under 1 : 2.

Leret under fundamentsfladen regnes dobbeltsidigt drænet mellem fundamentsfladen og kridtet.

Konsolideringen regnes eendimensional.

Samlede konsolideringssætning

Idet prøven ved $t = 960$ min. ses at være færdigkonsolideret, findes konsolideringsmodulen

$$K = - d\bar{q} \frac{1+e}{de} = - 2 \frac{1+0,7234}{0,7062-0,7234} = 200 \text{ t/m}^2$$

Idet lerlagets lagtykkelse benævnes d og idet $B = L$ fås den samlede konsolideringssætning:

$$\begin{aligned} \delta_c &= \int_0^d \epsilon dz = \frac{V_s}{K} \int_{z=0}^{z=d} \frac{d(B+z)}{(B+z)^2} = \frac{V_s}{K} \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{B+d} \right) \\ &= \frac{96}{200} \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{8+4} \right) = 0,02 \text{ m} \end{aligned}$$

Tidsforløbet

For at finde hvor stor en del af den samlede konsolideringssætning, der er fremkommet efter 1 måned, betragtes tidsfaktoren:

$$T = \frac{kK}{\gamma_w H^2} t$$

som, idet T , k , K og γ_w er ens i forsøg og prototype, giver, at også forholdet t/H^2 skal være ens i forsøg og prototype. Heraf findes den tid t_f , som i forsøget svarer til tiden $t_p = 1$ måned i prototypen:

$$t_f = \frac{t_p \cdot H_f^2}{H_p^2} = \frac{30 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0,01^2}{2,0^2} = 65 \text{ sec}$$

Ved $t_f = 65$ sec. vil det ved interpolation i forsøgsresultaterne ses, at prøven har poretallet $e = 0,7210$. Konsolideringsgraden er da:

$$U = \frac{0,7210 - 0,7234}{0,7062 - 0,7234} = 0,14 = 14 \text{ }^\circ\text{/o}$$

Fundamentet vil følgelig efter 1 måneds forløb have undergået konsolideringssætningen:

$$\delta = \delta_c \cdot U = 0,02 \cdot 0,14 = 0,003 \text{ m}$$

KONKLUSION

Til tidspunktet $t = 1$ måned efter belastningens påførelse vil fundamentet have undergået konsolideringssætningen $\delta = 0,3$ cm.

EKSEMPEL 5.7: Konsolideringssætning ved ændrede totale spændingerGIVET

På et vanddækket areal er jordbundsforholdene følgende:

Fra kote - 2,0 til kote - 4,0: Sand med $\gamma_m = 1,9 \text{ t/m}^3$
 - 4,0 - - 10,0: Dyndet, blødt ler med $\gamma_m = 1,6 \text{ t/m}^3$, $k = 10^{-7}$
 m/sek og $K = 50 \text{ t/m}^2$.
 - 10,0 - - 11,0: Sand med $\gamma_m = 2,0 \text{ t/m}^3$.
 Under kote - 11,0 : Moræneler

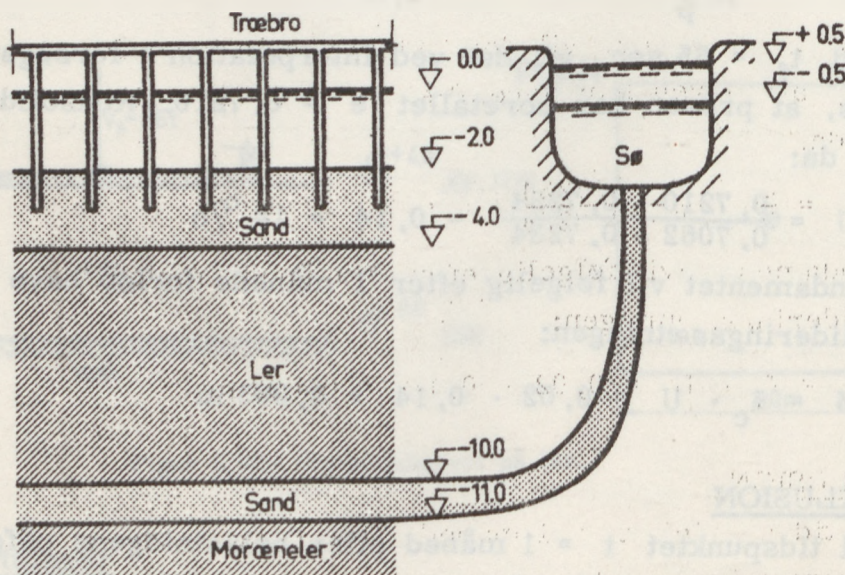
Vandspejlet står til stadighed i kote 0,0.

Hen over det vanddækkede areal fører en spinkel træbro, som er funderet på tynde træpæle, der er rammet ca. 1 m ned i det øverste sandlag.

Det nederste sandlag står i direkte forbindelse med vandet i en fjerntliggende sø, hvis vandspejlskote varierer med årstiden. Vandspejlet kan om sommeren synke til kote - 0,5 og om efteråret stige til kote + 0,5.

ØNSKES

Bestem størrelsen og retningen af de bevægelser træbroen undergår i takt med variationen af vandspejlskoten i den fjerntliggende sø.

LØSNING

Figur 5.7A: Snit gennem træbro.

De totale spændinger i jorden på det vanddækkede areal vil til stadighed være konstante. Poretrykket i det nedre sandlag og dermed poretrykket i lerlaget varierer i takt med vandspejlskoten i den fjerntliggende sø. Da summen af de effektive spændinger og poretrykket til stadighed er konstant og lig den totale spænding, må også den effektive spænding variere i takt med vandspejlskoten i den fjerntliggende sø. Da ændringer i de effektive spændinger i en jordmasse giver anledning til konsolideringsdeformationer, vil det øvre sandlag og dermed træbroen bevæge sig op og ned i takt med vandspejlsændringen i den fjerntliggende sø.

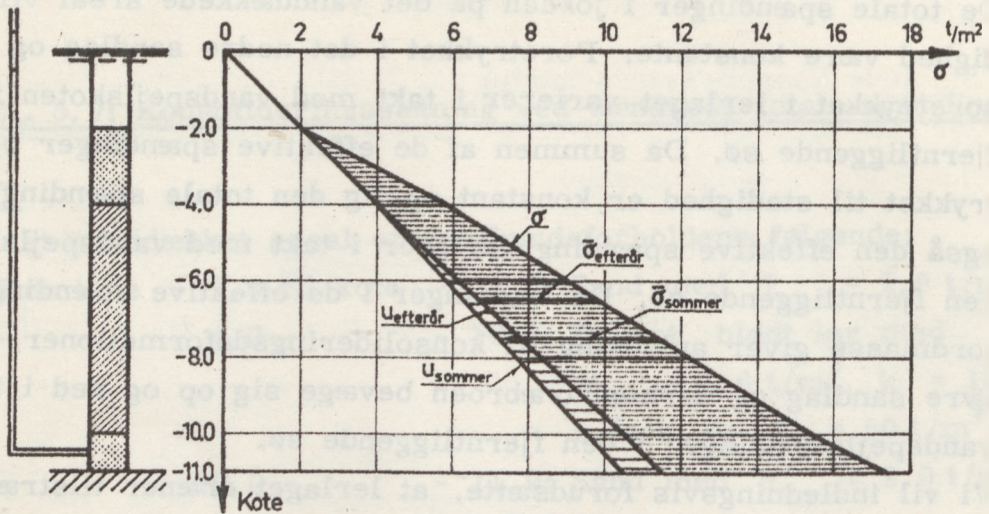
Vi vil indledningsvis forudsætte, at lerlaget dræner tilstrækkeligt hurtigt til, at poretryksvariationen i lerlaget følger variationen i vandspejlskoten i den fjerntliggende sø. Det tilladelige i at gøre denne forudsætning skal senere eftervises.

Først beregnes, som vist i nedenstående skema, spændingerne i jordlagene, dels under forudsætning af at vandspejlet i den fjerntliggende sø står i kote - 0,5, og dels under forudsætning af, at det står i kote + 0,5. Spændingerne er grafisk fremstillet på figur 5.7B.

kote	$\sigma = \sum \gamma d$ (t/m ²)	VS i kote - 0,5		VS i kote + 0,5	
		u (t/m ²)	$\bar{\sigma} = \sigma - u$ (t/m ²)	u (t/m ²)	$\bar{\sigma} = \sigma - u$ (t/m ²)
0,0	= 0	0	0	0	0
- 2,0	0 + 1,0 · 2,0 = 2,0	2,0	0	2,0	0
- 4,0	2,0 + 1,9 · 2,0 = 5,8	4,0	1,8	4,0	1,8
- 10,0	5,8 + 1,6 · 6,0 = 15,4	9,5	5,9	10,5	4,9
- 11,0	15,4 + 2,0 · 1,0 = 17,4	10,5	6,9	11,5	5,9

Det ses, at de effektive spændinger ved lerlagets overside holder sig konstant året igennem, medens de ved lerlagets underside er 1 t/m² større om sommeren end om efteråret. Den hertil svarende konsolideringsdeformation er:

$$\delta_c = \int_0^d \varepsilon dz = \int_0^d \frac{d\sigma}{K} dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{50} \cdot 6 = 0,06 \text{ m}$$



Figur 5.7B: Spændingsvariationen i jorden.

Da de effektive spændinger i leret er større om sommeren end om efteråret, vil træbroens overside følgelig om sommeren ligge 6 cm lavere end om efteråret.

Det tilladelige i den gjorte forudsætning, om at lerlaget dræner tilstrækkeligt hurtigt til, at poretryksvariationen i leret følger vandspejlsvariationen i den fjerntliggende sø, skal nu eftervises. Af formelen for tidsfaktorer findes lerlagets konsolideringstid:

$$t = T \frac{\gamma_w H^2}{kK}$$

Af kurven for sammenhængen mellem konsolideringsgraden U og tidsfaktoren T ses, at lerlaget praktisk taget vil være færdigkonsolideret (dvs. $U = 100\%$) for $T = 2$. Heraf fås, idet der indsættes i ovenstående ligning:

$$t = 2 \cdot \frac{1 \cdot 3^2}{10^{-7} \cdot 50} = 36 \cdot 10^5 \text{ sec} = 40 \text{ dage}$$

Heraf ses det, at lerlaget vil dræne tilstrækkeligt hurtigt til, at poretryksvariationen i leret vil følge vandspejlsvariationen i den fjerntliggende sø.

KONKLUSION

Træbroens overside vil om sommeren ligge 6 cm lavere end om efteråret.

