

FYLLNINGSDAMMARS TÄTKÄRNA OCH FILTER

RAPPORT 2019:630



Fyllningsdammars tåtkärna och filter

Tekniska krav och rekommendationer

HANS RÖNNQVIST

ISBN 978-91-7673-630-2 | © Energiforsk december 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Sveriges dammsäkerhetsvägledning för fyllningsdammar är i behov av en uppdatering som tar hänsyn till de senaste årens forskning inom bland annat filtermaterial, tätjord och skadeutveckling i form av inre erosion.

Här har det internationella kunskapsläget identifierats och sammanställts i syfte att utgöra underlag till en uppdatering av RIDAS.

Studien har genomförts av RQV Teknik med Hans Rönnqvist som utförare. Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Maria Bartsch (Svenska kraftnät), Gunnar Sjödin (Vattenregleringsföretagen), Peter Viklander (Vattenfall) och Jonas Hammarson (Fortum).

Projektet har genomförts inom det dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar.

Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

Föreliggande rapport ger en samlad bild av tekniska krav och rekommendationer, dåtid till nutid, för utformning av tätkärna och filter till fyllningsdammar. Sammanställningen ökar förståelsen för utvecklingen av materialkraven över tiden för dessa avgörande komponenter i en damm och informationen kan användas som ett hjälpmedel vid design av tätjord och kritiska filter (finfilter).

I en fyllningsdamm utgör tätkärnan den tätande zonen (den hydrauliska barriären i en flödessystemet) som möjliggör en uppdämning. Filtret till tätkärnan, det s.k. finfiltret eller det kritiska filtret, är avgörande för tätkärnans långtidsfunktion och skydd. I gällande svenska vägledning (RIDAS, 2012) finns krav och rekommendationer kring utformningen av dessa viktiga dammzoner. Denna vägledning lämnar relativt stort utrymme till bedömning och det finns risk att dels ej helt ideala material specificeras och/eller dels att erhållna material in-situ avviker från specificerade.

Föreliggande rapport rekommenderar uppstramning av vissa tekniska krav i syfte att säkerställa funktionen över tiden hos materialen i fråga. För tätjorden innebär det: i) att avsedd finjordshalt uppnås in-situ (dvs avsedd permeabilitet), ii) minskad separationsbenägenhet, samt iii) ingen mottaglighet för suffusion pga. inre instabilitet. Vad gäller finfiltret så innebär de striktare rekommendationerna: i) att specificerat material i större utsträckning kan erhållas in-situ, ii) större grad av ensgradering och därmed minskad risk för separation, iii) minskad risk för att uppkrossning (vid hantering, utläggning och packning) leder till för hög finjordshalt.

Striktare krav och rekommendationer innebär förbättringar funktionsmässigt, men samtidigt kan det föra med sig svårigheter byggtkniskt (t.ex. framtagning) och en fördyrning ekonomiskt; aspekter som behöver tas i beaktan i förhållande till de dammsäkerhetsmässiga fördelar det kan innebära.

Summary

This report provides an overview of engineering requirements and recommendations, past and present, for the design of core and filter materials for embankment dams. The compilation will improve the understanding of how design criteria have evolved over time and it may be used as a go-to tool in the design of materials to core zones and critical filters.

The core zone of an embankment dam is the hydraulic barrier that enables the impoundment of the reservoir. The filter to the core, i.e., the critical filter, is the most important component for the core's long-term function and protection. The current Swedish dam safety guidelines (RIDAS, 2012) provides design criteria for these vital dam components, however, it is composed of a relatively high degree of margin for judgment, which introduces the risks for designing materials that are less ideal to begin with and/or deviates in-situ from what was intended in the specification.

This report recommends stricter requirements for some of the current design criteria to ensure acceptable long-term function of these materials. For the core soil these will make sure that: i) the intended fines content (material $< 0,063$ mm) is achieved in-situ (i.e., permeability), ii) the susceptibility to segregate is reduced, and iii) the susceptibility to suffusion (due to internal instability) is eliminated. For the filter material, stricter requirements will ensure: i) that the intended material is achieved in-situ, ii) higher degree of grading uniformity and thus reduced susceptibility to segregation, and iii) reduced risk that crushing (from handling, placing and compacting) will result in excessive fines content.

Stricter design criteria and recommendations will result in improvements in terms of function; however, these may also bring increased construction related difficulties (e.g., production) and increased costs; aspects that need to put in relation with the improvements in dam safety that they may incur.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Allmänt	7
1.2	Uppdrag och syfte	7
1.3	Utförare	7
1.4	Disposition	7
2	Tätkärna (tätjord av morän)	8
2.1	Allmänt	8
2.2	Materialspecifikationer	8
2.3	Packningsförfarande	9
2.4	Övriga rekommendationer	10
3	Finfilter (kritiskt filter)	13
3.1	Allmänt	13
3.2	Materialspecifikationer	13
3.3	Packningsförfarande	15
3.4	Övriga rekommendationer	15
4	Symboler och terminologi	18
4.1	Symboler	18
4.2	Terminologi	18
5	Referenser	19
	Appendix I svensk vägledning	21
	Materialspecifikationer	21
	Erosion och filterkrav	22
	Packning och packningsförfarande	24
	Grundläggning och packning	27
	Permeabilitet	28
	Utförande, tätjord och filter	30
	Övrigt	33
	Appendix II internationell vägledning	36
	Materialspecifikationer	36
	Erosion och filterkrav	38
	Packning och packningsförfarande	42
	Grundläggning och packning	46
	Utförande, tätjord och filter	47
	Övrigt	50

1 Inledning

1.1 ALLMÄNT

Syftet med fyllningsdammar kan vara många, dels för att reglera flöden, för potentiell energi till elproduktion, dels för vattenhushållning, bevattning, rekreation, mm. Likväl som att syftet kan vara mångfacetterat, så finns många olika typer av fyllningsdammsutformningar, från den enkla homogena tvärsektionen (enstaka ingående jordmaterial) till mer komplexa zonerade tvärsektioner. Vilken typ fyllningsdammen tillhör bygger i mångt och mycket på sorten av stödfyllning (stenfyllningsdamm, jordfyllningsdamm, eller kombination) och/eller på typen av tätkärna (jord, betong, asfalt, mm). Gemensamt dock är användandet av filterzoner i övergången mellan dammzoner med vitt skilda materialslag och egenskaper, t.ex. mellan tätkärna och stödfyllning. I föreliggande rapport behandlas enbart tätkärnor av jordmaterial (i huvudsak morän) och filter som skyddar, filtrerar och dränerar det vattenflöde som uppstår genom tätkärnan, s.k. *kritiskt filter*.

1.2 UPPDRAG OCH SYFTE

Arbetet med föreliggande rapport inom ramen för Dammsäkerhetstekniskt Utvecklingsprogram 2016 – 2019 har utförts i projektet VK12116: Tekniska krav på tätkärna och filter. Projektets syfte är att identifiera det internationella kunskapsläget inom fyllningsdammar i syfte att ge underlag till en uppdatering av dagens svenska vägledning RIDAS TV. Genom att sammanställa det byggnadstekniska kunskapsläget om filter och tätkärna, historiskt till nutid, ger föreliggande rapport en samlad bild av de tekniska krav och rekommendationer som ställs på filter och tätkärna.

1.3 UTFÖRARE

Rapporten har skrivits av Hans Rönnqvist, RQV Teknik AB, teknisk doktor inom området geoteknik med inriktning på inre erosion i fyllningsdammar. Hans har snart 20 års erfarenhet av konsultation inom svenska fyllningsdammar och är svensk representant i ICOLD:s europeiska arbetsgrupp om inre erosion (EWGIE, European Working Group on Internal Erosion).

1.4 DISPOSITION

Rapporten är uppdelad i huvudsak två kapitel: *kap 2* om tätkärnan och *kap 3* om filtret. Bägge kapitel bygger i sin tur på bilagorna *Appendix I svensk vägledning* och *Appendix II internationell vägledning*. Det övergripande upplägget är att först behandla specifikationer för materialsammansättning och packningsförfarande, och slutligen gå in på övriga rekommendationer.

2 Tätkärna (tätjord av morän)

2.1 ALLMÄNT

Tätkärnan är den tätande zonen i en fyllningsdamm och utgör därför den hydrauliska barriären som tillåter uppdämningen av vatten på dess uppströmssida. Svenska fyllningsdammar har i regel tätkärna av morän (jord), men tätningen kan utgöras av andra slag, t.ex. betong eller asfalt. I det följande behandlas enbart tätkärna av jord, med speciellt fokus på morän.

Appendix I återger svensk vägledning och Appendix II det internationella dito. Dessa sammanfattas i det följande.

2.2 MATERIALSPECIFIKATIONER

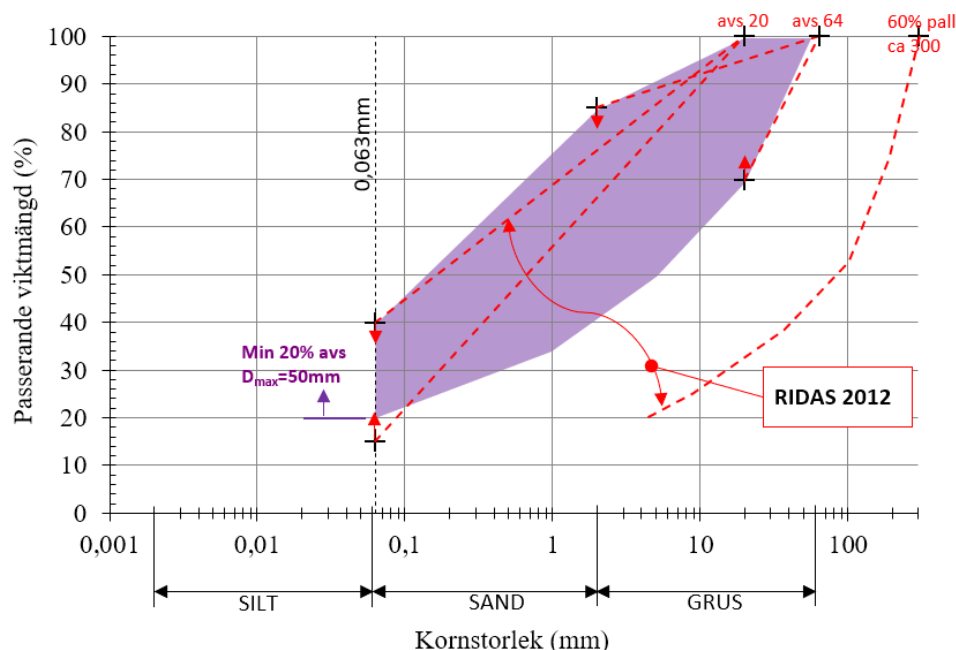
Krav på finjordshalt ($\% < 0,063 \text{ mm}$) specificeras vanligen för att säkerställa tillräcklig täthet hos tätjorden samt för att uppnå rätt bearbetbarhet. Figur 2-1 sammanställer vanligt förekommande specifikationer och där framgår att internationell vägledning och den svenska överensstämmer väl. Revideringar har knappt förekommit de senaste 30-40 åren.

Vanligen specificeras minst $15 \% < 0,063 \text{ mm}$ när materialet är omgraderat till 20 mm. Detta görs i syfte att få en tätjord med permeabilitet (hydraulisk konduktivitet) på $k \leq 10^{-7} \text{ m/s}$. Samtidigt begränsas största stenstorlek till 250 – 300 mm eller maximalt 2/3 av tillåten packad pallhöjd/lagertjocklek (ibland används istället 60 % av tjockleken) (ICOLD, 1989; RIDAS, 2012). I praktiken innebär det att det totala materialet, om mängden $> 20 \text{ mm}$ medräknas, kan ha en finjordshalt som i stor grad avviker in-situ från vad som specificerats (för material $< 20 \text{ mm}$), se figur 2-2. Likaså kan formen på den verkliga kornkurvan avvika från vad som bedöms som idealt och därför ha oönskade egenskaper som t.ex. inre instabilitet, språnggradering och/eller benägenhet för att separera. Via kvalitativa rekommendationer såsom att materialet ska vara "välgraderat", ha en "jämn" kornkurva, eller att endast "enstaka" stenar i fyllningen får vara i storleksordningen 2/3 av pallhöjden så är tanken att sådana avvikelser (och tillika svagheter) ska ha beaktats. Det lämnar dock rum för stor grad av bedömning och risken finns att ej ideala material används.

Ny forskning (Rönnqvist et al, 2017) har visat att tydligare begränsningar bör definieras för tätjord (av morän) för att erhålla in-situ det material som verkligen specificerats (figur 2-1). Det görs då genom att specificera finjordshalt i förhållande till det *totala* materialet, se figur 2-2. Tätjorden bör då ordnas med en finjordshalt ($< 0,063 \text{ mm}$) på minst 20 % på det totala materialet och att det totala materialet begränsas till $D_{\max} 50 \text{ mm}$ (dock ej kontaktjord som behöver striktare krav). Det inses att sådan uppstramning kan innebära att uttaget från en given täkt påverkas negativt i förhållande till det ekonomiskt optimala. Dock är de byggnadstekniska fördelarna värdefulla; t.ex. i) avsedd finjordshalt uppnås in-situ (dvs avsedd permeabilitet), ii) minskad separationsbenägenhet, samt iii) eliminerad mottaglighet för suffusion pga. inre instabilitet.

Tätkärna (morän) Materialspekifikation	
Internationell vägledning	ICOLD (1989)
	- Minimum 15 % < 0,063 mm och maximum 50 % < 0,063 mm. $D_{\max} = 150 - 300 \text{ mm}$ och $2/3 \cdot \text{pallhöjd}$
Svensk vägledning	NVE (2012)
	- Ska utgöras av "välgraderad morän". - Minimum 15 % < 0,075 mm avs. $D < 19 \text{ mm}$.
Forskning	Vattenfall (1988)
	- Minimum 15 % < 0,06 mm och maximum 40 % < 0,063 mm avs. $D \leq 20 \text{ mm}$. - Hydr.kond. $k = 0,03 - 3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. $D_{\max} < 60\% \text{ lagertjocklek vid torrpäckning}$ och $D_{\max} < 250 \text{ mm}$ vid våtpäckning.
	RIDAS (2012)
	- Minimum 20 % < 0,063 mm avs. $D_{\max}$. $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$.

Figur 2-1 Tätkörd: materialspekifikation.



Figur 2-2 Tätkörd: sammanställning av rekommendationer (lila streck, symboler och ytor) i jämförelse med dagens svenska vägledning (röd-streckat).

2.3 PACKNINGSFÖRFARANDE

Figur 2-3 återger packningsförfarande från svensk vägledning och figur 2-4 det internationella. Själva utförandet praktiskt sett har utvecklats sedan tidiga anvisningar av BK (1958) gällande dammbyggnad, men i stort sett så är vägledningen kring tätkördspackning likartad i dagsläget. Vad gäller torrpäckning,

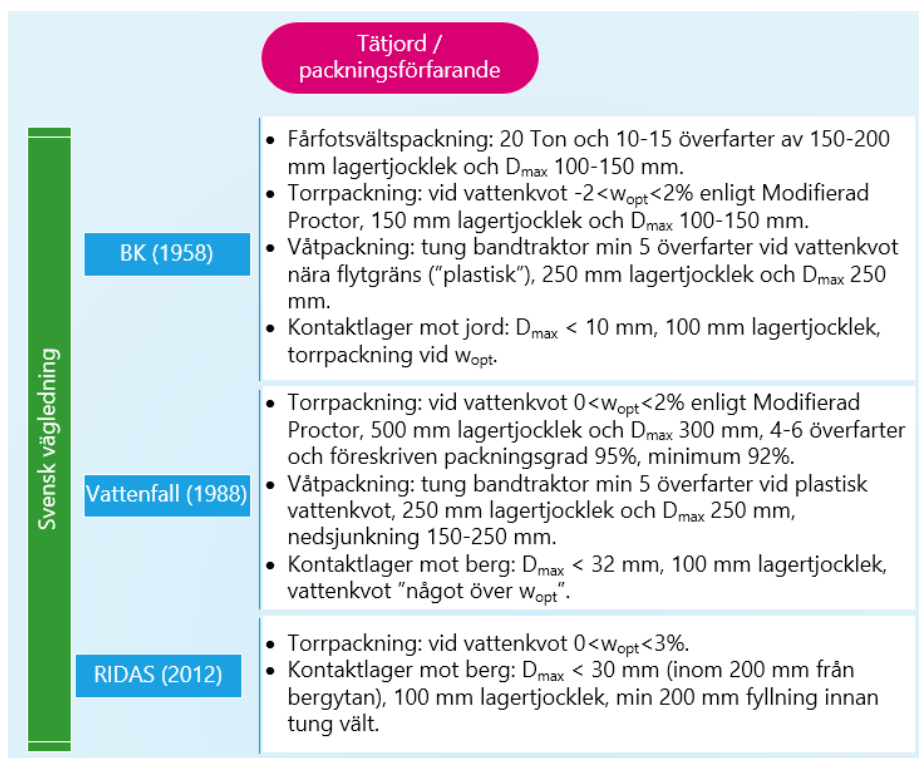
dvs. packning vid Optimal vattenkvot (enligt Modifierad Proctor labbpackning, dvs. Tung laboratoriepackning), som är den metod som normalt används idag, så var anvisad vattenkvot i BK (1958) $(w_{opt}-2\%) < w < (w_{opt}+2\%)$. Sedermera har den nedre gränsen justerats upp till i nivå med w_{opt} (Vattenfall 1988) och numera har även den övre gränsen uppjusterats till max 3 % över w_{opt} (RIDAS 2012).

Vad gäller packningsgrad så föreskrivs 95 % (av max torrdensitet erhåller från Modifierad Proctor) och minst 92 % (Vattenfall, 1988). Internationellt, se figur 2-3, så relateras packningsgrad till Standard Proctor max torrdensitet, med anvisning om minst 98 % vid vattenkvot från w_{opt} till max 2% högre. (Standard Proctor ger lägre max. torrdensitet jämfört med Modifierad Proctor, men istället högre Optimal vattenkvot, se Appendix II).

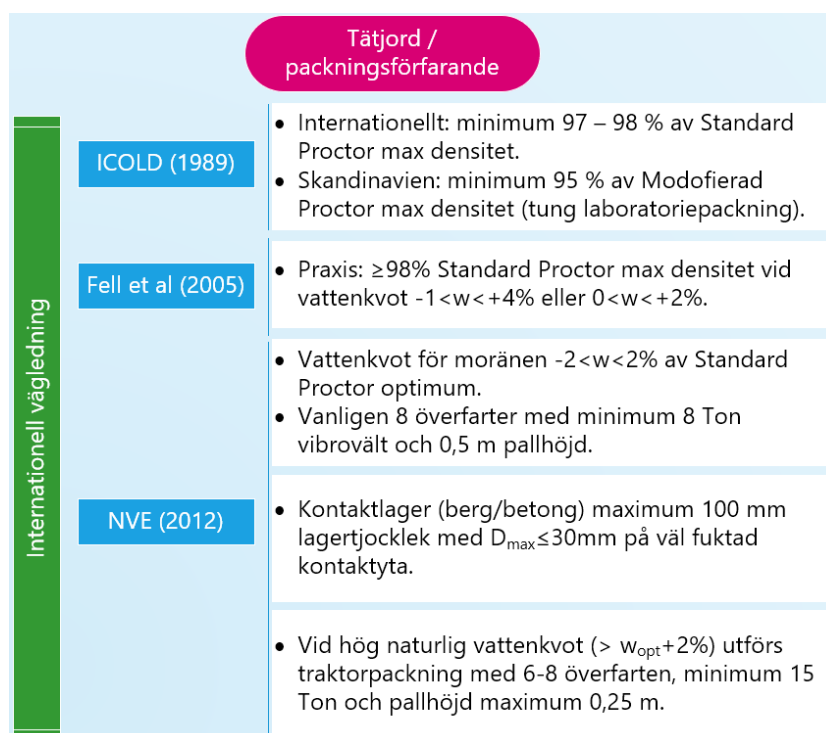
2.4 ÖVRIGA REKOMMENDATIONER

Figur 2-5 sammanfattar övriga rekommendationer och synpunkter vad gäller tätjord varav följande kan nämnas speciellt:

- Bristande packning innebär högre permeabilitet än avsett (storleksordning 20x).
- Packning vid små variationer i vattenkvot kan ge lägre inre friktionsvinkel à 3-4°.
- Dammzoner bör göras bredare om det föreligger risk för dragspänningar i dammkroppen.
- Flera densitetsprover bör tas vid anslutningar och inte bara på ytan utan även djupare ner i pallen.
- Finns risk för valvverkan bör våtpackning undvikas (pga sprickbildning, primärsättningar).



Figur 2-3 Tätjord: packning svenskt perspektiv.



Figur 2-4 Tätjord: packning internationellt perspektiv.

Tätjord / övriga rekommendationer		
Övriga rekommendationer	BK (1958)	Bristande packning kan leda till 20x så hög permeabilitet än vid god packning.
	Jansen (1988)	- Om det föreligger risk för dragspänning så bredda zoner för att möjliggöra självläkning av sprickor. - Minska risken för tvärsprickor till dammlinjen genom gradvis ändring av dammlinje och konvex uppströms. - Flera densitetsprover bör tas i varje pall vid anslutningar. - Pallhöjder bör kontrolleras och dokumenteras.
	Vattenfall (1988)	- Erforderlig packningsgrad tillses på ytan och 100 mm ned i lagret. - Vid användandet av lättare packningsutrustning (samt bandtraktor) uppnås packningskurvor som understiger övre gränskurvor. - Våtpackning minskar variationer i permeabilitet ger god täthet, homogenitet, mindre sättningar vid vattenmättnings och mindre långtidssättningar. - Våtpackning ger lägre densitet än vid torrpäckning, ger ett högt porvattentryck, större primärsättningar än vid torrpäckning och där risk finns för valverkan (trånga, djupa partier) bör våtpackning ej användas pga.
	ICOLD (1989)	- Minskad packningsgrad kan uppkomma på fyllningsytan pga. sprickbildning vinkelrätt färdriktningen. - Fullskaliga kompakteringstester bör utföras. - Små variationer av vattenkvot kan leda till minskning med 3-4° av inre friktionsvinkeln hos moränen.
	Fell et al (2005)	- Standard Proctor-bestämning av optimal vattenkvot och max torrdensitet bör användas istället för Modifierad Proctor, för att få en våt packning med låg permeabilitet och hög flexibilitet. - Modifierad Proctor-bestämd max torrdensitet ger högre densitet men också högre permeabilitet och sprödare fyllning.
	NVE (2012)	Olämpligt att skifta från traktorpäckning till vibrovält eftersom det skapar blöta underliggande lager som kan leda till sprickbildning i ovanliggande styvare lager.

Figur 2-5 Tätjord: övrigt.

3 Finfilter (kritiskt filter)

3.1 ALLMÄNT

Finfiltret till en fyllningsdamms tätkärna är ett s.k. kritiskt filter, dvs. kritiskt för tätkärnans skydd mot inre erosion och avgörande för dess långtidsfunktion. På andra ställen i en fyllningsdamm så kan det finnas filter som är av mindre betydelse och därmed eventuellt hamnar under lägre ställda tekniska krav, men i det följande behandlas främst kritiska filter.

Appendix I återger svensk vägledning och Appendix II det internationella dito. Dessa sammanfattas i det följande.

3.2 MATERIALSPECIFIKATIONER

Utvecklingen kring filterkrav och vägledning tog speciellt fart under 1980-talet i samband med forskningsprojektet vid Soil Conservation Services i Nebraska, USA, under ledning av Dr. James Sherard (Sherard & Dunnigan, 1989). Sedermera har dessa empiriska samband vidareutvecklats och förfinats för olika ändamål. Figur 3-1 sammanställer den vägledning som legat till grund för svensk filterdesign och figur 3-2 visar det från internationellt perspektiv.

I Sverige utformas finfilter mot tätjord av morän normalt enligt följande:

- D_{15} mellan 0,2 – 0,7 mm (filtrerande krav),
- max 5 % < 0,063 mm (sprickstoppande, kollapsbarhet),
- största stenstorlek $D_{90}=25$ mm (för att undvika separation pga. månggradering).

I rådande svensk vägledning (RIDAS, 2012) ställs mindre strikt krav vad gäller det filtrerande kravet om basmaterialet (tätjorden) har < 30% finjordshalt (material < 0,063 mm). Vad gäller kritiska finfilter (t.ex. nedströmsfilter till tätkärna av morän) bör mindre strikta krav än $D_{15} \leq 0,7$ mm ej tillämpas.

I litteraturen (se figur 3-2) finns rekommendationer för att minska materialseparation:

- $D_{100}/D_{10} < 6$ (säkerställer ensgradering),
- Max 40 % > 4,75 mm (begränsar grushalten), och
- $D_{\max} = 18$ mm (största stenstorlek).

I övrigt bör filtret ej uppvisa plasticitet eller kohesion (se figur 3-2) varav den striktaste rekommendationen är 0 % < 0,150 mm, men max 2 % < 0,075 mm.

För att säkra upp mot potentiell uppkrossning så bör för övrigt filtret minst uppfylla max 3 % < 0,075 mm för att inte finjordshalten ska bli för hög in-situ.

Filter / svenskt Materialspecifikation		
Svensk vägledning	BK (1958)	• $D_{15}/d_{15} \geq 5$ (undre gräns)
		• $D_{50}/d_{50} \leq 15$ (övre gräns ensorterat)
		• $D_{15}/d_{15} \leq 45$ (övre gräns osorterat)
	Vattenfall (1988)	• $D_{15} = 0,2 - 0,7 \text{ mm}$
		• $D_{15}/d_{15} > 4$
	RIDAS (2012)	• $D_{15} < 0,7 \text{ mm}$
		• $D_{15}/d_{15} > 4$ (min $D_{15} = 0,1 \text{ mm}$)
		• $D_5 \geq 0,06 \text{ mm}$
		• $D_{90} = 25 \text{ mm}$ (om $0,5 < D_{10} < 1,0 \text{ mm}$)
		Filtrerande krav
		Filtrerande krav
		Dränerande krav
		Filtrerande krav
		Dränerande krav
		Ingen kohesion
		Ingen separation

Figur 3-1 Filter: materialspecifikation svenskt perspektiv.

Filter / Internationellt Materialspecifikation		
Internationell vägledning	Sherard et al (1963)	• $D_{15}/d_{15} \geq 5$
		• $D_{15}/d_{85} < 5$
		• Max 5% < 0,075mm
	Ripley (1984)	• $D_{100}/D_{10} < 6$
	Sherard et al (1984)	• Max 60% > 4,75mm
		• $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$
	Ripley (1986)	• Min 60% < 4,75mm
		• $D_{\max} \leq 18 \text{ mm}$
		• Max 2% < 0,075mm i filter, helst 0% < 0,150mm
	Sherard & Dunnigan (1989)	• $D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$
		• $D_{15}/d_{15} \geq 4$ men > 0,1mm
	NEH (1994)	• $D/d \leq 5$ avs. < 60%
		• $C_u = D_{60}/D_{10} \leq 6$
		• D_{10} inom 0,5-1,0mm
	Fema (2011)	• $D_{90} \leq 20-25 \text{ mm}$
		• $2 < D_{60}/D_{10} < 6$
		• Max 3% < 0,075mm
	Fell et al (2005)	• Max 2% < 0,075mm
	Fell et al (2012)	• Oplastisk finjord
		• $D_{100} < 50 \text{ mm}$
		Ingen separation
		Dränerande krav
		Säkra mot nedkrossning
		Ingen språnggradering
		Ingen separation
		Ingen språnggradering
		Ingen separation
		Ingen kohesion
		Ingen separation
		Ingen separation
		Filtrerande krav
		Dränerande krav
		Ingen kohesion
		Filtrerande krav
		Dränerande krav
		Filtrerande krav

Figur 3-2 Filter: materialspecifikation internationellt perspektiv.

Sammanställs i detta avsnitt redovisade filterkrav och rekommendationer så erhålls envelopen (lila fält och svarta linjer och symboler) i figur 3-3. I jämförelse med dagens svenska vägledning (RIDAS, 2012) så framgår att mer ensgraderade filtermaterial rekommenderas. Utan att i detta ta hänsyn till svårigheten att ta fram

sådant material, eller merkostnaden därav, så innebär det följande åtstramning av tidigare krav:

- Största tillåtna stenstorlek anpassas så att $D_{100}/D_{10} < 6$ (Ripley, 1984), dvs. ca $D_{\max} = 4$ mm för filtrets grova gräns (vid max $D_{15} = 0,7$ mm).
- Envelopens bredd anpassas så att $D/d \leq 5$ upp till 60% passerande viktmängd (NEH, 1994).
- Max 2% < 0,075 mm, helst $D_{\min} > 0,150$ mm (Ripley, 1986).

Dessa striktare rekommendationer innebär förbättringar vad gäller hållbarhet, beständighet och funktion, men samtidigt inses att ensgraderade material även för med sig svårigheter byggt tekniskt (framtagning) och fördyrning ekonomiskt (framtagning, behov av ytterligare övergångslager, mm).

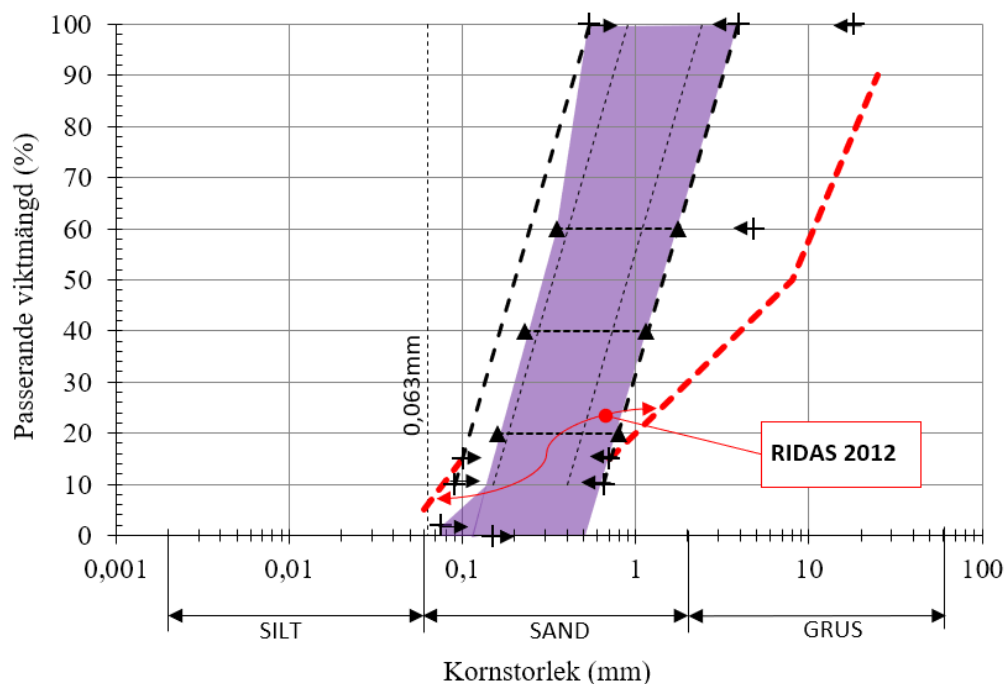
3.3 PACKNINGSFÖRFARANDE

Figur 3-4 sammanställer den vägledning som finns kring filterpackning. Internationellt anvisas minst 70 % packningsgrad medan i svensk vägledning minst 85-90 % (Vattenfall, 1988).

3.4 ÖVRIGA REKOMMENDATIONER

Övriga rekommendationer framgår av figur 3-5 varav följande kan nämnas speciellt:

1. Finfiltret bör utgöras av tvättad kohesionsfri sand (helst 0 % < 0,150 mm).
2. Filterdelen nedströms tåtkärnan bör utgöras av en 3-zons filterkomponent.
3. Filterdelen uppströms tåtkärnan bör utgöras av en 2-zons filterkomponent.
4. Enkelfilter (månggraderade singelfilter) bör undvikas helt och hållet.
5. Tillse tillräcklig bredd och dränagekapacitet, samt bredda filtret om det finns risk för sidorörelser (jordbävning) eller om materialet är benäget att separera.
6. Filtret bör vara inre stabilt och klara att ta hand om en koncentrerad läcka.
7. Filtret bör inte nedbrytas över tid och effekt av nedkrossning bör beaktas.



Figur 3-3 Filter: sammanställning av tillgängliga filterkrav och rekommendationer (svart och lila streck, symboler och ytor) i jämförelse med dagens svenska vägledning (röd-streckat).

Filter / packningsförfarande		
Internationell vägledning	CDA (2007)	• Min packningsgrad $R_D=70\%$
	Fema (2011)	• Min packningsgrad $R_D=70\%$
Svensk vägledning	BK (1958)	• Lagertjocklek 300mm (samtidig vattenspolning och vibrering)
	Vattenfall (1988)	• Finfilter: 4 överfarter/8 Ton vibrationsvält/0,5m lagertjocklek. • Grovfilter: 6 överfarter/16 Ton vibrationsvält/1,0m lagertjocklek. • Kontroll av packningsgrad medel 90-95% och min 85-90%. • Vattning med direktspolning (för att spola ihop filter/stödfyll/bergfyll).

Figur 3-4 Filter: packning.

Filter / övriga rekommendationer		
Övriga rekommendationer	Sherard et al (1984)	Slopa kraven på D_{50}/d_{50} och D_{15}/d_{15}
	Ripley (1986)	- Mimimera risken för separation. - Använd tvättad kohesionsfri sand med "sprickstoppling" $0\% < 0,150\text{mm}$. - Använd 2-zons filterkomponent uppströms tätkärnan. - Använd 3-zons filterkomponent nedströms tätkärnan utgörande av: -sand -12mm -grus 12-75mm -sten 75-250mm
	Vattenfall (1988)	- Uppströmsfiltret ska vara självläkande/lättrörligt: -kohesionsfri -tvättad sand -låg packningsgrad
	Milligan (2003)	- Undvik "enkelfilter". - Kontrollera att filtret kollapsar vid uppfuktning.
	Fell et al (2005)	- Säkerställ teoretisk bredd för filterverkan. - Tillse tillräcklig dränagekapacitet. - Bredda filterzonen om det finns risk för separation. - Säkerställ möjlig sidorörelse pga. jordbävning. - Filterbredd bör baseras på dammhöjd.
	USSD (2011)	- Filtret ska -ej separera -ej nedbrytas -ej ha skenbar/verklig kohesion -vara inre stabilt -ha tillräcklig dränagekapacitet (portryckslinjen ska ej överstiga nedströms horisontaldränage) -kunna ta hand om koncentrerade läckor - Smala filter är olämpliga.
	Fema (2011)	Effekt av nedkrossning bör beaktas.
	RIDAS (2012)	Använd beständiga material som motstår vittring och nedbrytning.

Figur 3-5 Filter: övriga rekommendationer.

4 Symboler och terminologi

4.1 SYMBOLER

D_x	Partikelstorlek (mm) för filtret vid x passerande viktmängd (%).
d_x	Partikelstorlek (mm) för basmaterialet (tätjorden) vid x passerande viktmängd (%).
$D_{\max}$	Största stenstorlek (mm). (Även D_{100}).

4.2 TERMINOLOGI

Filter	Övergångslager mellan material med vitt skilda egenskaper (kornördelning).
Finjordshalt	(%) Mängd material $< 0,063$ mm. (Internationellt används $0,075$ mm som gräns).
Kritiskt filter	Kritiska filter är främst filter som anligger närmast tätkärnan, s.k. finfilter, och är av den anledningen avgörande för långtidsfunktionen hos fyllningsdammen. Det finns andra filterövergångar som kan vara lägre betydelse, dels om de endast belastas delar av tiden eller skyddar ett material av mindre betydelse (t.ex. i dränagesystem eller slänthörstärkningar).
Packningsgrad	(%) Erhållen eller eftersträvd torrdensitet i förhållande till maximal torrdensitet bestämd i jordlaboratorium.
Tätkärna	Den hydrauliska barriären (tätande delen) i en fyllningsdamm.

5 Referenser

- Bernell L. (1970) Moränens egenskaper som byggnadsmaterial, SGI rapport 39, 19-31.
- BK (1958) Anvisningar för utförande och kontroll av jorrdammar, Statens Vattenfallsverk, 117s.
- BOR (2012) Embankment Dams, Design Standards No. 13, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, May 2012.
- CDA (2007) Dam safety guidelines 2007, Canadian Dam association, CDA.
- Dussault R., Larocque G., Ouimet J. (1970) Outardes 4 – Barrage principal, Can. Geotechn. J. 7(17), (in French), 17-36.
- Fell R., MacGregor P. Stapledon D., Bell G. (2005, 2012) Geotechnical engineering of dams, Taylor and Francis.
- FEMA (2011) Filters for embankment dams – Best practices for design and construction, FEMA – Federal emergency management agency, US, Oct. 2011.
- Fetzer C.A. (1988) Earthfill construction, Ch. 10 Earthfill dam construction and foundation treatment, Advanced Dam Engineering, ed. Jansen R.B., Van Nordstrand Reinhold, New York, USA.
- Design features – ch. 9 Earthfill dam design and analysis, earthfill construction
- ICOLD (1989) Moraine as embankment and foundation material, ICOLD Bulletin 69, 1989.
- Jansen R.B. (1988) Design features – Ch. 9 Earthfill dam design and analysis, Advanced Dam Engineering, ed. Jansen R.B., Van Nordstrand Reinhold, New York, USA.
- Leps T.M. (1979) Sinkholes in dams of coarse broadly graded soils: Discussion, ICOLD, New Dehli, India, I:101-105.
- Milligan V. (2003) Some uncertainties in embankment dam engineering, J. Geotechn. and Geoenv. Eng., 129 (9), 785-797.
- NEH (1994) National Engineering Handbook – Ch. 26 Gradation design of sand and gravel filters, Soil Conservation Service, 1994.
- NVE (2012) Veileder for fyllingsdammer, Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg, NVE – Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Nilsson Å., Norstedt U. (1991) Evaluation of ageing processes in two Swedish dams, ICOLD, Vienna.
- RIDAS (2012) Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Svensk Energi, Stockholm, Sverige.

- Ripley C.F. (1984) Discussion of: Progress in rockfill dams, J. Geotechn. Eng., ASCE, 114 (2), 236-240.
- Ripley C. F. (1986) Internal stability of granular filters: Discussion, Can. Geotech. J., 23, 255-258.
- Rönnqvist H. (2015) On the assessment of internal erosion of dam cores of glacial till, PhD thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Rönnqvist H., Viklander P., Knutsson S. (2017) Experimental investigation of suffusion in dam core soils of glacial till, Geotechnical Testing Journal, 40(3), 426-439.
- Sherard J.L., Dunnigan L.P. (1989) Critical filters for impervious soils, Journal of Geotechnical Engineering, 115(7), 927-947.
- Sherard J.L., Woodward R.J., Gizienki S.F., Clevenger W.A. (1963) Earth and earth-rock dams – engineering problems of design and construction, John Wiley and Sons, New York.
- Sherard J.L., Dunnigan L.P., Talbot J.R. (1984a) Basic properties of sand and gravel filters, J. of Geotech. Eng., ASCE, 110 (6), 684-700.
- Sherard J.L., Dunnigan L.P., Talbot J.R. (1984b) Filters for silts and clays, J. of Geotech. Eng., 110 (6), 701-718.
- USSD (2011) Materials for embankment dams, USSD – United States society on dams, Denver, USA.
- Vattenfall (1988) Jord- och stenfyllningsdammar, Vattenfalls dammhandbok, Stockholm, Sverige.
- Webster J.L. (1970) Mica dam designed with special attention to control of cracking, ICOLD, Montreal.

Appendix I svensk vägledning

MATERIALSPECIFIKATIONER

Syntes:	Referens:																		
De flesta moräner har >15% d<0,075mm, vilket är egenskaper hos jordarter som är "i regel täta". Vattengenomsläpplig a jordarter har <4% d<0,075mm.	Bernell (1970): vattenhalten och portalet. Undersökningar har visat att jordarter, som har finjordshalt > 15 %, räknat på 0,075 mm sikt, i regel är täta. Till denna grupp hör de allra flesta moräner. Hos de vattengenomsläppliga jordarterna ligger finjordshalten under 4 %, vilket innebär att endast ett fåtal grusiga moräner																		
Specifikation tätjord: • Siltig, sandig morän. • 15-40% d<0,06mm avs. <20mm. • k = 0,03-3·10⁻⁷ m/s. • Måttlig stenhalt. • Blockfattig. • D_{max} < 60% lagertjocklek vid torrpäckning, <250mm vid våtpäckning. Specifikation nedströmsfilter: • Kohesionslös. • D₁₅ = 0,2-0,7mm. • D_{max}<60mm. Specifikation uppströmsfilter: Kohesionslös. • Lättrörligt (kollapsbart). • Lägre packningsgrad än för tätjorden.	Vattenfall (1988): ☐ siltig, sandig typ med finjordshalt (<0,06 mm) 15–40 % av material <20 mm, ☐ permeabilitet 3·10⁻⁷ – 3·10⁻⁹ m/s, ☐ vattenkvot i fält omkring den optimala vid tung laboratoriestampning, ☐ god packbarhet enligt provpackning, ☐ måttlig stenhalt, ☐ blockfattig, ☐ närbelägen. Filtermaterial skall vara kohesionsfritt, vilket kontrolleras genom vattendränkning av prover (sandkakeprov). <table><tr><td>Tätkärna</td><td>sandig siltig morän</td><td>finjordshalt 15–40 % av material <20 mm</td></tr><tr><td></td><td></td><td>D_{max} < 60 % av lagertjockleken vid torrpäckning</td></tr><tr><td></td><td></td><td>D_{max} < 250 mm vid våtpäckning</td></tr><tr><td>Finfilter</td><td>grusig sand</td><td>D₁₅ = 0,2–0,7 mm</td></tr><tr><td></td><td></td><td>D₅₀ < 6 mm</td></tr><tr><td></td><td></td><td>D_{max} < 60 mm</td></tr></table> I allmänhet brukar man anse att ett fullgott filter är viktigare på tätkärnans nedströmssida än på dess uppströmssida, eftersom erosion och urspolningar vanligen initieras mot nedströmshållet. Erfarenheten visar emellertid, att när urspolningar väl inträffar i kärnan, utgör även uppströmsfiltret ett väsentligt försvar mot dammgenombrott. Inträffar emellertid ett läckage genom kärnan, fordras att uppströmsfiltret genom sitt strömningsmotstånd begränsar läckageflödet samt kan plugga igen strömningskanalerna i tätkärnan och förhindra att erosionen griper omkring sig. Ur denna synpunkt är det önskvärt att uppströmsfiltrets material är lättrörligt. Det måste därför vara kohesionsfritt. Vidare brukar det ibland föreslås att det skall bestå av enbart sand utan finmaterial och med lägre packningsgrad än tätjorden.	Tätkärna	sandig siltig morän	finjordshalt 15–40 % av material <20 mm			D _{max} < 60 % av lagertjockleken vid torrpäckning			D _{max} < 250 mm vid våtpäckning	Finfilter	grusig sand	D ₁₅ = 0,2–0,7 mm			D ₅₀ < 6 mm			D _{max} < 60 mm
Tätkärna	sandig siltig morän	finjordshalt 15–40 % av material <20 mm																	
		D _{max} < 60 % av lagertjockleken vid torrpäckning																	
		D _{max} < 250 mm vid våtpäckning																	
Finfilter	grusig sand	D ₁₅ = 0,2–0,7 mm																	
		D ₅₀ < 6 mm																	
		D _{max} < 60 mm																	

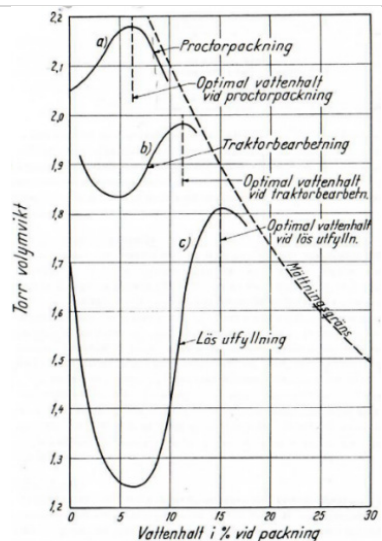
• Sand utan finmaterial.	
Specifikation morän: • Min. 15% $d < 0,06 \text{ mm}$ avs. $D < 20 \text{ mm}$. • Max $k = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. • $D_{\max} \leq 60\%$ lagertjocklek. • Max 85% $< 2 \text{ mm}$ avs. 64mm. • Min 70% $< 20 \text{ mm}$ avs. 64mm.	RIDAS (2012): Finjordshalten ($< 0,06 \text{ mm}$) för tätjorden skall uppgå till minst 15 % av material mindre än 20 mm. Tätvärdet, som bestäms på ett standardiserat sätt med nippel- eller rörpermeameter, skall vara lägst 6,5 (motsvarande en hydraulisk konduktivitet av $3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$). Finjordshalten bör vara mindre än ca 40 % (räknat på material $< 20 \text{ mm}$) för att ge tillfredsställande bearbetbarhet och begränsad påverkan av regn. Vidare bör mängden korn passerande sikt 2 mm vara högst 85 % och halten korn passerande sikt 20 mm minst 70 % av material mindre än 64 mm. Enstaka stenar med största tvärmått 60 % av använd lagertjocklek (efter packning) får ingå i tätjordsfyllningen. Eventuella större stenar bör sorteras bort i tätjordstakten.
För att begränsa risken för suffusion i moränjord (pga. inre instabilitet) så rekommenderas: • Min 20% $d < 0,063 \text{ mm}$ avs. $D_{\max}$. • $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$.	Rönnqvist et al (2017) profiles and mass loss data. The unstable till gradations exhibited the following grading characteristics which appear influential to the susceptibility to suffusion of this kind of soil: (1) fines content, $F_{\#200} < 20 \%$, (2) sand fraction ($0.06-2 \text{ mm}$) $< 25 \%$, and finer fraction, $F_f < 30 \%$. Conversely, $F_{\#200} > 25 \%$, which corresponds to $F_f > 35 \%$, may, thus, serve as additional limits to suffusion susceptibility of this kind of soil. Although in need

EROSION OCH FILTERKRAV

Syntes:	Referens:
Filterkrav: • $D_{15}/d_{15} \geq 5$ (undre gräns). • $D_{50}/d_{50} \leq 15$ (övre gräns ensorterat). • $D_{15}/d_{15} \leq 45$ (övre gräns osorterat). Typiskt erosionskänsliga jordarter ligger inom spannet 0,1-1,0 mm (ensgraderad finsand-mellansand).	BK (1958): Undre gräns: 1. $D_{15} \text{ filtermaterial} \geq 5 D_{15} \text{ basmaterial}$ Övre gräns för ensorterat material: 2. $D_{50} \text{ filtermaterial} \leq 15 D_{50} \text{ basmaterial}$ Övre gräns för osorterat material: 3. $D_{15} \text{ filtermaterial} \leq 45 D_{15} \text{ basmaterial}$ 4. $D_{50} \text{ " " } \leq 30 D_{50} \text{ " "}$

	Kornstorleken för de typiskt erosionskänsliga jordarterna ligger approx. mellan gränserna 0,1 - 1,0 mm, dvs. erosion uppkommer lättast i jordarter, bestående av ensorterad grovmå och mellansand. Diagrammet i fig. 14 visar vattenhastighetens inverkan på ensorterade jordarter med olika kornstorlek.																		
Filterkrav: • $D_{15}/d_{15} > 4$. • $D_{15} < 0,7 \text{ mm}$. Avs. basmaterial med 30-80% finjordshalt.	Vattenfall (1988): <table border="1"> <thead> <tr> <th>Basmaterial med finjordshalt < 30 %</th> <th>Basmaterial med finjordshalt 30–80 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$4 < D_{15}/d_{15} < 40^*$</td> <td>$4 < D_{15}/d_{15}$</td> </tr> <tr> <td>$D_{15}/d_{85} < 4^{**}$</td> <td>$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$</td> </tr> <tr> <td>$D_{50}/d_{50} < 25$</td> <td>$D_{50}/d_{50} < 25$</td> </tr> <tr> <td>$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$</td> <td>$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$</td> </tr> </tbody> </table>	Basmaterial med finjordshalt < 30 %	Basmaterial med finjordshalt 30–80 %	$4 < D_{15}/d_{15} < 40^*$	$4 < D_{15}/d_{15}$	$D_{15}/d_{85} < 4^{**}$	$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$	$D_{50}/d_{50} < 25$	$D_{50}/d_{50} < 25$	$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$	$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$								
Basmaterial med finjordshalt < 30 %	Basmaterial med finjordshalt 30–80 %																		
$4 < D_{15}/d_{15} < 40^*$	$4 < D_{15}/d_{15}$																		
$D_{15}/d_{85} < 4^{**}$	$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$																		
$D_{50}/d_{50} < 25$	$D_{50}/d_{50} < 25$																		
$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$	$D_{\text{max}} < 60 \text{ mm}$																		
Filterkrav: • $D_{15} < 0,7 \text{ mm}$. • $D_{15}/d_{15} > 4$, dock min. $D_{15} = 0,1 \text{ mm}$. • $D_5 \geq 0,06 \text{ mm}$. • Kohesionslös och ej plastisk finjord. • $D_{90} = 25 \text{ mm}$ (om $0,5 < D_{10} < 1,0 \text{ mm}$). • Beständiga partiklar.	RIDAS (2012): Tabell 7.2 - 3 Filterregler för olika basmaterial för att uppnå filtrering <table border="1"> <thead> <tr> <th>Basmaterial med finjordshalt < 30 %</th> <th>Basmaterial med finjordshalt 30 - 80 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$D_{15}/d_{15} < 40^*$ eller $D_{15}/d_{85} < 4^{**}$</td> <td>$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$</td> </tr> </tbody> </table> * Detta krav blir avgörande för månggraderat basmaterial. Om kriteriet ger $D_{15} < 0,7 \text{ mm}$, kan dock D_{15} väljas till maximum 0,7 mm. ** Detta krav blir avgörande för ensgraderat basmaterial. Vidare räknas finjordshalten, dvs. halt av material mindre än 0,06 mm, på material < 20 mm. För att filtret skall få tillräcklig vattengenomsläpplighet behöver materialet alltid ha $D_{15} > 4 \cdot d_{15}$, och vara större än 0,1 mm. D_{15} för filtermaterialet skall då på samma sätt som vid övriga regler bestämmas på filterkurvan för allt filtermaterial. D_5 skall inte understiga 0,06 mm. Filtermaterialet skall vara kohesionsfritt, d.v.s. att filtermaterialet som passerar sikt nr 40 (0,425 mm) får inte vara plastiskt (ASTM D4318). Tabell 7.2 - 4 Maximal stenstorlek hos filter för att undvika stenseparation <table border="1"> <thead> <tr> <th>Minimum D_{10} för filtermaterialet, mm</th> <th>Maximum D_{90} för filtermaterialet, mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 0,5</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>0,5 - 1,0</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>1,0 - 2,0</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2,0 - 5,0</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>5,0 - 10,0</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>10,0 - 50,0</td> <td>60</td> </tr> </tbody> </table> För att filterzoner och dränage fortlöpande skall fylla sin funktion under anläggningens livstid ställs krav på beständighet för materialen. Jordmaterialen skall provas på laboratorium och resultaten skall visa på beständiga partiklar som inte förändras av schaktnings-, bearbetnings-, transport-, utläggnings- och packningsmetoder, långsiktig vittring eller erosion, se vidare [7.2 - 46].	Basmaterial med finjordshalt < 30 %	Basmaterial med finjordshalt 30 - 80 %	$D_{15}/d_{15} < 40^*$ eller $D_{15}/d_{85} < 4^{**}$	$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$	Minimum D_{10} för filtermaterialet, mm	Maximum D_{90} för filtermaterialet, mm	< 0,5	20	0,5 - 1,0	25	1,0 - 2,0	30	2,0 - 5,0	40	5,0 - 10,0	50	10,0 - 50,0	60
Basmaterial med finjordshalt < 30 %	Basmaterial med finjordshalt 30 - 80 %																		
$D_{15}/d_{15} < 40^*$ eller $D_{15}/d_{85} < 4^{**}$	$D_{15} < 0,7 \text{ mm}$																		
Minimum D_{10} för filtermaterialet, mm	Maximum D_{90} för filtermaterialet, mm																		
< 0,5	20																		
0,5 - 1,0	25																		
1,0 - 2,0	30																		
2,0 - 5,0	40																		
5,0 - 10,0	50																		
10,0 - 50,0	60																		

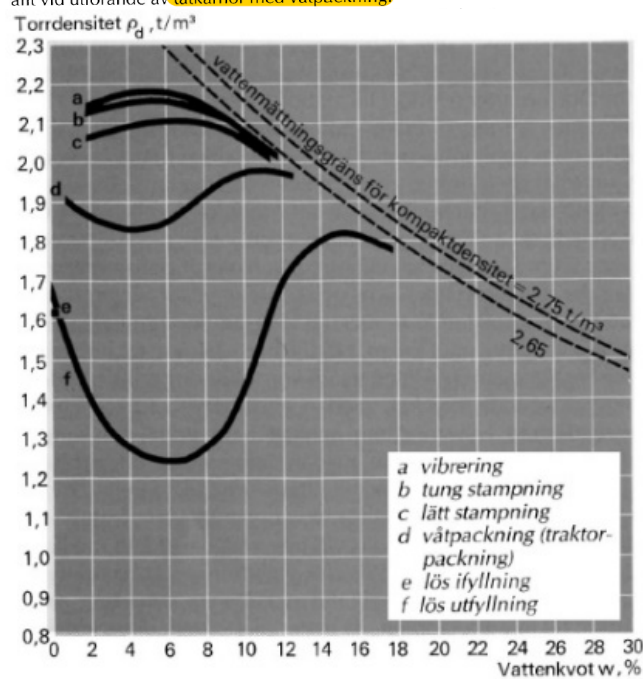
PACKNING OCH PACKINGSFÖRFARANDE

Syntes:	Referens:
<u>Specifikationer</u> Ursprunglig packning med fåfotsvältning: • 20T. • 10-15 överfarer. • 150-200mm lagertjocklek. • D_{max} ca 100-150mm. Torrpackning: • 150mm lagertjocklek. • D_{max} ca 100-150mm. • Vattenkvot vid optimal vattenkvot enligt Modifierad Proctor, $\pm 2\%$. Våtpackning: • 250mm lagertjocklek. • D_{max} ca 250mm. • Vattenkvot nära flytgräns (plastisk). • Tung bandtraktor, min 5 överfarer. Filterpackning: • 300 mm lagertjocklek • vattenspolning och vibrering.	<u>BK (1958):</u> Lagertjockleken vid fåfotsvältning bör icke överstiga fårfötternas längd, dvs. 15 à 20 cm. Vältens vikt och utformningen av fårfötterna har stor betydelse för packningen. Vältvikten bör således vara minst ca 20 ton och yttrycket uppgå till 20 à 40 kg/cm². Antalet överkörningar bestäms efter provtagning på arbetsplatsen. I regel uppnås tillräcklig packning efter 10 - 15 överkörningar. Packning med fårfotsvältar kräver utsortering av sten större än 10 à 15 cm. Vid torrpackning utbreddes materialet i dammens längdriktning i högst 15 cm tjocka lager. Vid materialets utbredning skall iakttagas att stenanhopningar eller stenränder icke uppkommer. Stenar större än 10 - 15 cm skall utsorteras. Eventuellt erforderlig vattning utföres jämnt och likformigt över hela lagret. Vattenhalten skall ligga i närheten av den för torrpackning optimala, vilken bestäms genom provpackning enl. den modifierade Proctormetoden, se kap. 12, Bil. F 1. En avvikelse av högst 2% från det optimala värdet kan tillåtas. Packningen utföres med fårfotsvältar Vid våtpackning utbreddes materialet i dammens längdriktning i högst 25 cm tjocka lager. Vid materialets utbredning skall iakttagas att stenanhopningar eller stenränder icke uppkommer. Stenar större än 25 cm skall utsorteras. Vid våtpackning åstadkommes en jämn höjning av vattenhalten lättast på så sätt, att man vattnar fyllningsmassorna invid traktorns schaktblad under själva utbredningen. Vattningen skall skötas av kunnig man, som ej får taga order av traktorföraren. Den vattenhalt, som kräves vid våtpackning, ligger nära materialets flytgräns. Jordmaterialets konsistens skall vara plastisk. Packningen och bearbetningen utföres med tung bandtraktor genom minst 5 överkörningar över varje del av fyllningen. Trak- Utläggning av tätffyllning bör alltid påbörjas i dammens lägsta partier. Tätffyllning bör alltid utläggas i horisontella lager. Filtermaterial bör utläggas i högst 30 cm tjocka lager, som packas genom vattenspolning och vibrering. Vid utförande av filter i jorrdamm iordningställes samtidigt angränsande partier av tätkärna och stödfyllning.  Fig. 9. Volymviktsskurvor, erhållna vid Proctorpackning, traktorbearbetning och lös utfyllning. Sandig morän från Lilla

<u>Specifikationer</u> Torrpackning: • Vattenkvot vid optimal och max +2%. • 500mm lagertjocklek. • D_{max} ca 300mm. • Föreskriven packningsgrad är 95%, medelvärde 95% med min 92%. • Vibrationsvältning så att avsedd packningsgrad uppnås i påförda lagret och 100mm ned i underliggande skikt med 250 mm överlapp i sidled. • 4-6 överfarter men bör fastställas med provpackning i fält. • Körning endast i dammens längdriktning. Våtpackning: • 500mm lagertjocklek. • D_{max} ca 250mm	<u>Vattenfall (1988):</u> Torrpackning av tätjordsfyllning sker med en vattenkvot vanligen 0–2 procentenheter över den optimala. Materialet breddas ut i horisontala lager i dammens längdriktning med början i de lägsta partierna. Lagertjockleken skall efter packning vara högst 0,5 m och storleken hos enskilda stenar normalt högst 300 mm. Större stenblock sorteras bort i jordtaget, exempelvis på så sätt att grävmaskinens grävskopa förses med galler eller grind av påsvetsade stänger. Packningen utförs med vibrationsvältar av sådan tyngd och vibrationsfrekvens att erforderlig packningsgrad nås i det påförda skiktet och 100 mm ned i underliggande skikt. Erfarenheten har visat, att ytan får lägre packningsgrad än materialet i övrigt på grund av deformationer när välten passerar. All körning skall ske i dammens längdriktning och överlappningen i sidled skall vara minst 250 mm. Antalet överfarter med en hastighet av 2–3 km/h fastställs genom provpackning och provtagningar på dammen. Normalt krävs 4–6 överfarter. Resultatet skall fortlöpande kontrolleras genom provtagningar samt dessutom gärna med hjälp av kompaktometer på välten. Normalt föreskrivs en packningsgrad av 95 %. Eftersom vattenkvoten och korngraderingen varierar under arbetets gång, eftersträvas 95 % som medelvärde under en månad med ett minimivärde av 92 %. Något förhöjd packningsgrad föreskrivs ibland för den lägsta delen av höga dammar, särskilt om stränderna är branta. Om våtpackning skall utföras, täcks ändå grunden först av tunna, torrpackade jordlager på samma sätt som vid torrpackning. Utbredningen av materialet för våtpackning sker i dammens längdriktning, varvid lagertjockleken för packning är högst 250 mm. Största stenstorlek är 250 mm och det tillses vid utbredningen att inte stenanhopningar och stensträngar uppkommer. Jordmaterialet skall ha så hög vattenkvot att det blir plastiskt. Vattenkvoten utprovas så att traktorn sjunker 150–200 mm i det utbredda lagret. Våtpackningen utförs med tung bandtraktor som skall ha ett yttryck av minst 60 kPa (0,6 kp/cm²). Antalet överfarter skall vara fem eller fler i dammens längdriktning och överlappningen i sidled skall vara minst 250 mm. Packning av filtren utförs enligt särskilda föreskifter, vanligen med vibrationsvält, varvid antalet överfarter bestäms genom provtagningar i början av arbetet. Normalt fordras 4 överfarter av 8 tons vält för högst 0,5 m lagertjocklek (i finfiltret) och 6 överfarter av 16 tons vält för högst 1 m lagertjocklek (i grovfiltret). Packningsgraden hos finfiltret kontrolleras sporadiskt. Den bör vara i medeltal 90–95 % och minst 85–90 % av den som uppnås med tung laboriestedstämning eller laboriestedvibrering.
---	---

- Vattenkvot som ger plastisk konsistens, ca 150-200 mm nedsjunkning med tung bandtraktor.
- Min. 5 överfarer.
- Filterpackning:
- Vibrationsvält:
 - finfilter: 4 överfarer/8T, 500mm lagertjocklek.
 - grovfilter: 6 överfarer/16T, 1000mm lagertjocklek.
- D_{max} ca 250mm
- Sporadisk kontroll av packningsgrad, börvärde i medeltal 90-95% och min 85-90%.

De i diagrammet visade övre kurvorna representerar ytterlighetsgränser som uppnås med tunga packningsmaskiner eller tunna lagertjocklekar. Om lättare maskiner, t.ex. bandtraktorer används vid packningsarbetet, kommer packningskurvan att ligga mellan de övre gränsvärderna och kurvan för lös utfyllning. Packning av jorden med bandtraktor förekommer framför allt vid utförande av tätäckor med våtpackning.



Specifikationer

Torrpackning:

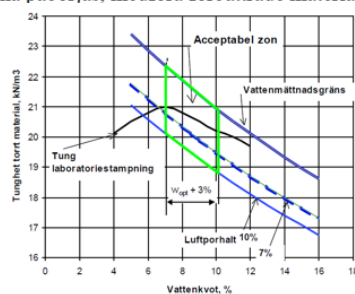
- Vattenkvot högre än optimala (enl. tung laboratoriestampning) och max +3%.

Våtpackning:

- Materialet breds ut med bandtraktor i tunna lager.
- Hög vattenkvot så den blir plastisk med 150-200mm nedsjunkning av traktorn.

RIDAS (2012):

Moränens vattenkvot vid placering i dammen skall vara högre än den optimala. För att ha tillräcklig bärighet bör vattenkvoten dock vara högst ca 3 % över den optimala enligt tung laboratoriestampning, jämför punkt 7.2.3.2.4 Packning - vattenkvot hos morän. Om materialet i täkten har högre vattenkvot kan dräneringsåtgärder, t.ex. genom utdikning i god tid före byggnadsarbetena påbörjas, medföra förbättrade materialegenskaper.



Acceptabel zon för moränens tunghet för torr material, vattenkvot och luftporhalt vid packning (tunghet för kornen 26.5 kNm³)

Förutom ovan beskrivna "torrpackningsmetod" kan "våtpackning" tillämpas. Jordmaterialet breds då ut med bandtraktor i tunna lager. Moränen har då så hög vattenkvot att den blir plastisk och traktorn sjunker 150-200 mm i det utbredda lagret. Denna metod kan ge en tätäckor som väl uppfyller ovan nämnda önskemål på egenskaper. Sättningsarna efter dammens färdigställning och vid första dämning har t.ex. oftast visat sig bli mindre än vid metoden med "torrpackningsmetoden". Metoden beskrivs mer i [7.2 - 2].

GRUNDLÄGGNING OCH PACKNING

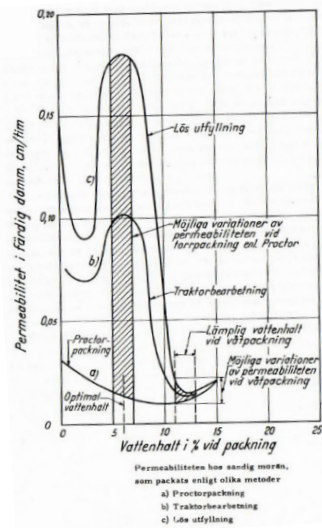
Syntes:	Referens:
<u>Föreskrifter</u> Grundläggning på jord: • Tätjord med $D_{\max} < 10 \text{ mm}$. • Torrpäckning vid optimala vattenkvoten. • Ej handpackning. • 100mm lagertjocklek. Grundläggning på berg: • Bergytan rensas till "någorlunda friskt och sprickfritt berg". • Tätjord med $D_{\max} < 10 \text{ mm}$. • 100mm lagertjocklek. • Vattenkvot som ger plastisk konsistens.	<u>BK (1958):</u> e) att alla i dammbotten befintliga brunnar, provgropar, diken o. likn. är utfyllda med väl packad tättyllning. Härtill bör endast användas material med kornstorlek $< 1 \text{ cm}$. Packningen utföres såsom torrpäckning vid optimal vattenhalt och en lagertjocklek av högst 10 cm. Jordmaterialet packas med vibrationslädare eller kantvibratorer. Handpackning kan ej anses ge tillfredsställande resultat och bör därför undvikas. Vid grundläggning på berg skall följande iakttagas: Bergytan rensas under hela det tätande partiet ned till någorlunda friskt och sprickfritt berg. a) Vid bergytans rensning och avjämning skall, för undvikande av ojämna sättningar, bergklackar och branta sidoväggar nedsprängas, så att lutningen i dammens längdriktning blir högst 1:1 och vertikala avsatser högst 0,5 m. b) Allt överhängande berg borttages på sådant sätt att lutningarna blir högst 1:1. c) Gropar och bergskrevor rensas noggrant, varefter de igenfylls med betong. Vid trasig bergyta utföres en sammanhängande betongavjämning. För god anslutning fordras att tätmaterialet packas mot en jämn yta. d) Vid dåligt berg, särskilt där jordlag av större omfattning förekommer, vilka till följd av den ökade belastningen kan medföra framtida sättningar i tättyllningen, utföres en armerad bottenplatta enligt närmare föreskrifter på ritningar. <u>Utläggningen och packningen av tättyllningen</u> I de fall, där tätkärna anslutes till jordlager, skall före utläggningen av det första tätskiktet det befintliga bottenskiktet till minst 25 cm djup bearbetas och packas efter samma principer som gäller för tättyllningen i övrigt. I de fall, där tätkärna anslutes till berg, skall till de 2 första lagren användas tättyllning, ur vilken material med kornstorlek $> 1 \text{ cm}$ bortsorterats. Materialet utbreddes i jämntjocka lager om ca 10 cm och varje lager packas med kantvibratorer eller vibrationslädare. Vattenhalten anpassas så att en plastisk konsistens erhålles. Varje del av tättyllningen packas noggrant, så att fullständig anslutning mellan bergyta och tättyllning överallt erhålles. <u>Vattenfall, 1988:</u> Där tätkärnan grundläggs på jord, jämnas grunden av före utläggningen av det första jordlagret och därpå packas marken på samma sätt som tätjordsfyllningen i övrigt. Där tätkärnan grundläggs på berg, används tätjord med högst 32 mm kornstorlek till fyllning av gropar och till de två första skikten; dock må största kornstorlek uppgå till högst 60 mm om stenhalten är låg. Lagertjockleken skall vara ca 100 mm i medeltal. Packningen görs med handvibratorer, så att fyllningen även i gropar och ojämnheter blir väl packad. Vattenkvoten bör vara något över optimum. <u>RIDAS (2012):</u> Där tätjorden grundläggs på jord skall, om inga särskilda åtgärder vidtas för att minska eller ta hand om beräknat läckage, det verifieras att undergrunden har motsvarande täthet som planerad ovanpåliggande tätkärna. I detta fall kan grundläggning göras genom att den framschaktade markytan avjämnas före utläggningen av det första tätjordslagret, varefter marken packas på samma sätt som fyllningen av tätjord i övrigt.
Grundläggning på jord: • Jordgrunden ska ha motsvarande täthet som tätkärnan.	

Grundläggning på berg: • Starkt uppsprucket berg borttages. • Injekteringstättning av berggrunden. • Öppna sprickor tätas. • Betongplatta gjuts under tåtkärnan vid dåligt berg och punktvis betongavjämningar vid gott berg. • $D_{max} \leq 30 \text{ mm}$ inom 200 mm närmast bergytan. • 100 mm lagertjocklek. • Packning med handvibratorer. • Vattenkvot över optimala vid lätt laboriöstampning. • Innan tung vält används bör det finnas min 200 mm fyll över berggrunden för att inte riskera slå sönder bergytan.	Vid grundläggning på berg uppnås i regel tillfredställande täthet med hjälp av injektering efter det att starkt uppsprucket berg i dagen är borttaget. Det behöver dock iaktas stor varsamhet då berget har öppna eller jordfyllda sprickor. Under tåtkärnan och under filterzonen skall alla öppna sprickor tätas. Vid uppsprucket berg rekommenderas att en betongplatta gjuts under tåtkärnan för att härigenom kunna täta bergets övre del i samband med injekteringen. Vid gott berg kan det dock vara tillfylles att endast göra punktvis ifyllnader med betong. Vid anslutning av tåtkärnan mot berg får stenstorleken inte överstiga 30 mm inom 200 mm närmast bergytan. Intill betongkonstruktioner får stenstorleken på samma sätt inte överstiga 30 mm. Erforderlig bredd för materialet med begränsat steninnehåll skall här anpassas med hänsyn till aktuell utrustning för utläggning och packning. Tjockleken av de först utlagda lagren skall vara högst 100 mm. Packningen görs med handvibratorer, så att fyllningen även i gropar och ojämnheter får erforderlig packningsgrad. Vattenkvoten för tätjorden med begränsad steninnehåll som bearbetas med lätt utrustning skall vara över den optimala vid lätt laboriöstampning, vilken normalt är några procent högre än vid tung laboriöstampning. Fyllningen byggs på detta sätt upp så att stora sammanhängande närmast horisontella ytor erhålls där packningen kan göras med större maskiner. För att undvika att berget slås sönder bör tjockleken på fyllningen över berg vara minst 200 mm innan bearbetning görs med tung vält.
---	---

PERMEABILITET

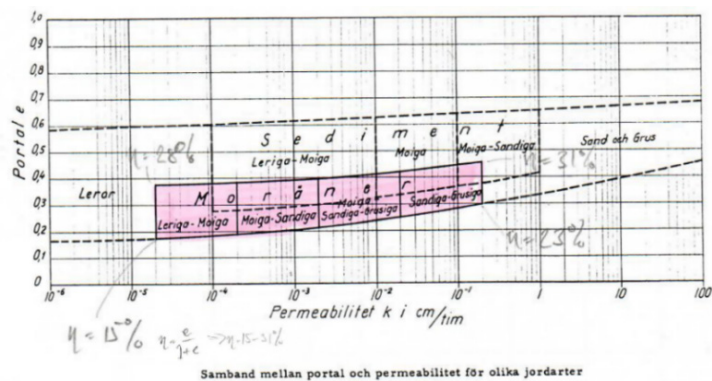
Syntes:	Referens:
Valt packningsförfaran de påverkar erhållen permeabilitet hos packad fyllning.	BK (1958): permeabiliteten hos ett jordmaterial, vilket packats vid olika vattenhalter enligt de standardiserade packningsmetoderna: Proctorpackning, tråktorbearbetning och lös utfyllning. Om packningen utföres vid vattenhalter, som ligger nära den optimala enligt Proctor, kan permeabiliteten i dammfyllningen variera inom det streckade område, som ligger mellan de bägge gränskurvor na a och c i fig. 10. Vid dålig packning blir permeabiliteten i detta fall ca 20 gånger större än vid fullgod packning.

Vid bristande packning kan permeabiliteten bli i storleksordning 20x högre än vid god packning.



Variationsområde för permeabilitet för olika moräntyper.

Bernell (1970), BK (1958):



material, som fått konsolidera under ett normaltryck av 2 kp/cm^2 . En sammanställning av permeabilitetens variationsområde för olika moräntyper i en jämförelse med motsvarande sedimentära jordarter visas i fig. 8. Av figuren framgår att en morän som följd av den lägre porositeten har betydligt mindre permeabilitet än motsvarande sediment med likartad gradering.

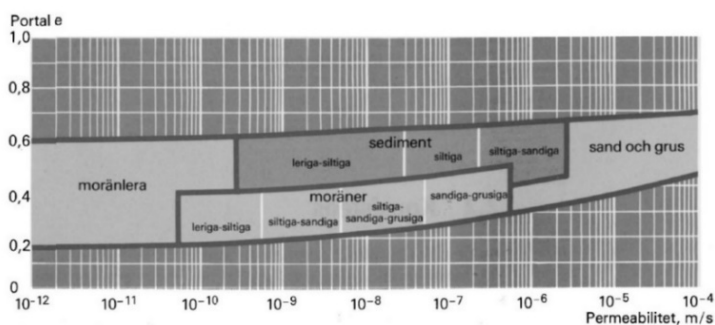
Vattenfall (1988):

Stor variation i permeabilitet beroende på korngradering och portal.

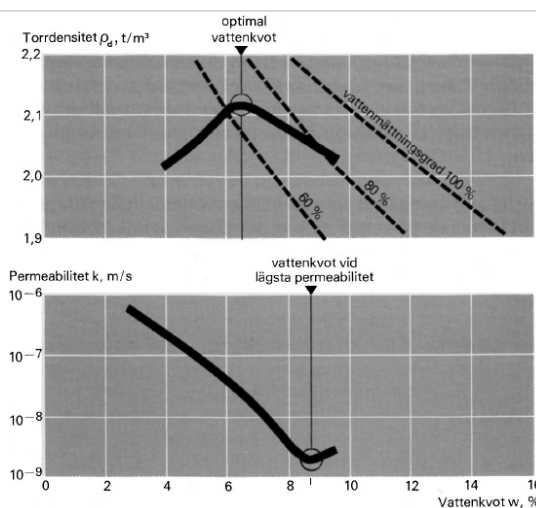
Ju finkornigare material desto större variationsområde.

Lägst vattenkvot erhålls vid packning ett par procentenheter över den optimala.

Packning vid låg vattenkvot erfordrar större insats vad gäller packningsförfarande och utförandekontroll, medan packning vid hög vattenkvot ger låg permeabilitet och är mindre känslig för utförandet.



Av figuren framgår att permeabiliteten varierar inom vida gränser, beroende på korngradering och portal. Ju finkornigare jorden är, desto större är variationsområdet.

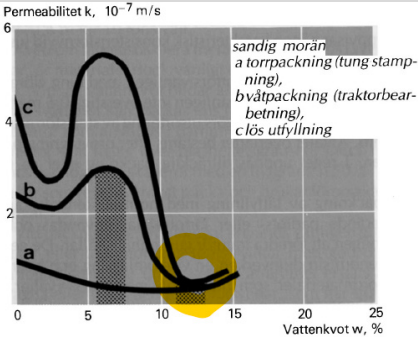


den lägsta permeabiliteten uppnås vid en vattenkvot som är ett par procentenheter över den optimala. Låg vattenkvot vid packningen fordrar ett effektivt packningsförfarande och noggrann kontroll på arbetsplatsen, medan en hög vattenkvot ger låg permeabilitet som är mindre beroende av packningsförfarandet.

UTFÖRANDE, TÄTJORD OCH FILTER

Syntes:	Referens:
Konsekvent användning av packningsmetod är att föredra men det utesluter inte att gå från <i>torrpackning till våtpackning</i> , däremot är det olämpligt att gå från <i>våtpackning till torrpackning</i>	<u>BK (1958):</u> Den konsekventa användningen av de olika packningsmetoderna utesluter dock icke den möjligheten, att man mycket väl kan övergå från torrpackning till våtpackning. Däremot är det motsatta förfaringsättet synnerligen olämpligt. Dels blir övergångslagret ej tillräckligt packat på grund av det mjuka underlaget, dels riskerar man sprickbildning till följd av ojämna sättningar.

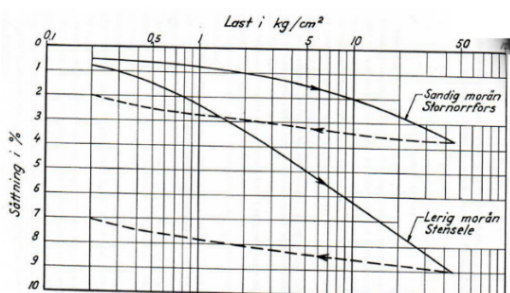
eftersom det kan innebära ett för mjukt underlag till det ovanliggande torrpäckade skiktet (vilket kan leda till bristande packning och ojämna sättningar och sprickbildning).	
Utförande bergpreparering: • Bergrensning bör ske utan sprängning. Bergyta rengörs med vatten och luft under tryck. Sprickor rensas. • Försiktig sprängning kan företas för att bortta klackar, överhäng och ojämnheter. • Lutningen i tvärled till dammen bör vara högst 1:1, avsatser högst 0,5 m höga tillåts, och ojämnheter avjämningsgjøtes. • Kontaktytor mellan berg och betongfyllningar kontaktinjekteras. • Som utgång för djupinjekterad tätskärn ordnas en förankrad, armerad 0,3-0,5m tjock betongplatta.	<u>Vattenfall (1988):</u> Bergrensning skall så vitt möjligt ske utan sprängning. Dock får försiktig sprängning användas för att jämna ut bergklackar och större ojämnheter samt för att ta bort överhängande eller branta partier. Det eftersträvas att lutningen i dammens längd- och tvärled blir högst 1:1. Vertikala avsatser får ha högst 0,5 m höjd. Gropar och skrevor rensas och fylls med betong, varvid betongytans lutning anpassas till bergets lutning. Mellan berg och betongfyllningar kontaktinjekteras. Efter rensningen rengörs bergytan med vatten och luft under tryck. Större öppna sprickor spolras, varefter de fylls med cementbruk. Därjämte borstas cementvälling in i finare sprickor. Sprickfyllda partier täcks med betongavjämning, betongplatta eller sprutbetong. Sprutning används dock inte på horisontala eller svagt lutande ytor, där skadligt återslag kan ske. Sprick- eller krosszoner som går vinkelrätt mot dammlinjen rensas till större djup än längsgående sprickor och fylls med betong som kontaktinjekteras. Efter rensning av sprickigt berg görs en armerad, förankrad betongplatta över den blivande injekteringsskärmen i berget. Normalt görs plattan 0,3–0,5 m tjock. I plattan lämnas eller borrar hål för djupinjektering av tätskärmen och för kontaktinjektering. Finfiltret mot tätkärnan läggs ut i turordning efter tätjorden men med samma lagertjocklek som denna. Sedan separerade stenar tagits bort från tätjordssläntens fot, fylls filtermaterialet mot tätjordens slänt. I kontaktytan kommer sedan nästa lager tätjord att skjutas ut över föregående filtermaterial som en kil. Det bildas på så sätt en sågtandad gräns mellan tätjord och filter. Finfiltret görs normalt minst 3 m brett (utom närmast krönet), varigenom materialet kan bredas ut med traktor. Med 5 m bredd får man två utläggningssträngar och minskad risk för genomgående stenseparation eller felaktigt material. I samband med packningen vattnas grovfiltret och eventuellt finfiltret genom direkt spolning med slang, så att filtermaterialet spolras ihop med angränsande filter, stödjord och bergfyllning. Vattning får inte ske vid frost, vilket kan begränsa den tillgängliga tiden för filterarbeten.

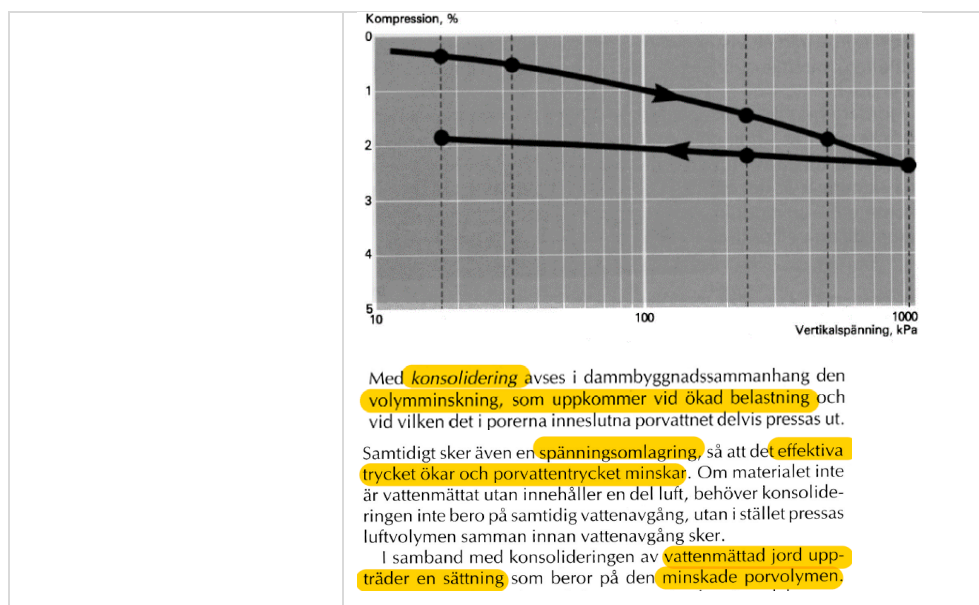
Utförande material: • Finfiltret läggs ut efter tätjorden med samma lagertjocklek. • Finfiltret görs minst 3m brett, men helst två strängar à 2,5m för att minska risken för tvärgående svagheter över filtret. • Under packningen vattnas grovfiltret och finfiltret genom direktspolning. Våtpackning: • Ger små variationer i permeabilitet. • Ger god täthet och homogenitet. • Ger små sättningar vid vattenmättnad, samt även små långtidssättningar. I jämförelse med torrpäckning ger våtpackning: • Högre inledande porvattentryck pga. den högre vattenkvoten. • Större primärsättningar. • Ökad risk för sprickbildning om förutsättningarna innebär risk för valvverkan Sättningar: • Långtidssättningen är vanligen mindre i tåtkärnan än i omgivande	Permeabiliteten för ett jordmaterial minskar med ökad vattenkvot vid packningen och är praktiskt taget oberoende av packningsförfarandet, när vattenkvoten ligger nära materialets flytgräns. Vid våtpackning blir därför möjliga variationer i permeabiliteten mycket begränsade, jämför permeabilitetsvärdena vid 6 % och 12 % vattenkvot i bild 2.13. Detta innebär en väsentlig fördel på arbetsplatsen, enär packningsarbetet endast behöver avse en viss bearbetning och homogenisering av jordmaterialet. Densiteten vid våtpackning blir under första tiden, innan konsolideringen ägt rum, lägre än vid torrpäckning, men man uppnår i stället god täthet och homogenitet. Efter konsolidering. Våtpackning medför vissa nackdelar som måste beaktas. Den höga vattenkvoten vid packningen ger höga porvattentryck, som sätter ner stabiliteten. Hos vanligen använda moräner av sandig typ konsoliderar emellertid materialet relativt snabbt, så att porvattentrycket praktiskt taget har försvunnit, när dammen är färdigbyggd. Om däremot materialet är finjordsrikt och mycket tätt, sker konsolideringen långsamt. I sådana fall är det av vikt att särskild undersökning görs beträffande konsolideringsförloppet hos tätjorden samt stabiliteten hos stödfyllningarna. Den höga vattenkvoten vid våtpackning medför att primärsättningarna blir större än vid torrpäckning. Med hänsyn till risken för sprickbildning bör man därför inte använda våtpackning vid fyllningsarbeten i trånga och djupa sektioner, där valvverkan kan äga rum, exempelvis i brunnar och dräneringsdiken. Å andra sidan minskar våtpackningen risken för valvverkan vid normala ojämnheter i dammbotten, eftersom materialet vid utläggningen har plastisk konsistens. Våtpackningsmetoden ger små sättningar vid vattenmättnad i samband med första uppdämningen och små långtidssättningar efter det att konsolideringen skett.  Långtidssättningarna i en damm är vanligen mindre i moränkärnan än i angränsande stenfyllningar. Detta gäller framförallt torrpäckade tåtkärnor av normal morän. Mätningar som gjorts under en 20-årsperiod, visar att långtidssättningarna i en packad tåtkärna uppgår till ca 0,1–0,2 % av dammhöjden. Däremot kan primärsättningarna i kärnan vara större än i omgivande stödfyllningar, vilket kan förorsaka valvverkan och initiera hydraulisk uppspräckning.
--	--

stenfyllning, speciellt vid torrpackad morän. • Primärsättningen, däremot, kan vara större i tät kärnan än omgivande stödfyllning vilket kan leda till valvverkan.	
Kvalitetskontroll: • Förorening av filter och dränage. • Kontroll av separation. • Kontroll av packningsgrad. • Kontroll av korngradering. • Zoners tjocklek och kontinuitet.	<u>RIDAS (2012):</u> Under byggnadstiden är noggrann kvalitetskontroll av, de relativt sett små, filterzonerna nödvändig med hänsyn till deras kritiska funktion, se vidare [7.2 - 2]. Viktiga aspekter under byggandet inkluderar att: • förhindra förorening av filter och dränage • förhindra stenseparation • åstadkomma god packningsgrad • övervaka korngraderingen • övervaka filterzonernas tjocklek och kontinuitet

ÖVRIGT

Konsolidering

Syntes:	Referens:
Konsolidering: • Volymminskning till följd av ökad belastning. • Spänningsomlagring ger ökat effektivtryck och minskat porvattentryck. • Minskad porvolym ger sättning.	<u>BK (1958):</u>  Samband mellan belastning och sättning för några typiska moräner <u>Vattenfall (1988):</u>



Kapillaritet

Syntes:	Referens:																							
Kapillär stighöjd: - Ökar med finkornighet och lagringsfasthet. Kapillär vattenströmning: - Strömning i omättad zon, speciellt vid dammkrönet och nedströmsfiltret är av betydelse pga. potentiell tjälpåverkan. Kapillaritet kan för finkornig morän uppskattas med följande samband: $k \cdot h_c^2 = 2 \cdot 10^{-7}$ $\frac{m}{s}$ m kapillaritet.	<u>Vattenfall (1988):</u> <table border="1"><thead><tr><th rowspan="2">Jordart</th><th colspan="2">Kapillär stighöjd, m</th></tr><tr><th>lös lagring</th><th>fast lagring</th></tr></thead><tbody><tr><td>Grovsand</td><td>0,03–0,12</td><td>0,04–0,15</td></tr><tr><td>Mellansand</td><td>0,10–0,35</td><td>0,12–0,50</td></tr><tr><td>Finsand</td><td>0,3–2,0</td><td>0,4–3,5</td></tr><tr><td>Grovsilt</td><td>1,5–5</td><td>2,5–8</td></tr><tr><td>Mellansilt-finsilt</td><td>4–10</td><td>6–12</td></tr><tr><td>Lera</td><td>>8</td><td>>10</td></tr></tbody></table> Eftersom tätkärnan i svenska jorddammar vanligen består av morän, är kännedom om moränernas kapillaritet av betydelse för att bedöma den kapillära vattenströmningen från grundvat-tenytan till angränsande delar av dammen. Frågan har framför- allt betydelse vid dammkrönet och nedströmsfiltret, där risken för tjälskador är störst. Vid Vattenfall har kapillariteten för olika moräntyper bestämts på material < 2 mm med användande av Beskows kapillarimeter (Bernell 1957). Enligt dessa undersökningar kan för sandiga och siltiga moräner kapillariteten h_c approximativt beräknas enligt formeln: $k \cdot h_c^2 = 2,0 \cdot 10^{-7}$ där k = permeabilitet i m/s, h_c = kapillaritet i m.	Jordart	Kapillär stighöjd, m		lös lagring	fast lagring	Grovsand	0,03–0,12	0,04–0,15	Mellansand	0,10–0,35	0,12–0,50	Finsand	0,3–2,0	0,4–3,5	Grovsilt	1,5–5	2,5–8	Mellansilt-finsilt	4–10	6–12	Lera	>8	>10
Jordart	Kapillär stighöjd, m																							
	lös lagring	fast lagring																						
Grovsand	0,03–0,12	0,04–0,15																						
Mellansand	0,10–0,35	0,12–0,50																						
Finsand	0,3–2,0	0,4–3,5																						
Grovsilt	1,5–5	2,5–8																						
Mellansilt-finsilt	4–10	6–12																						
Lera	>8	>10																						

Skjuvhållfasthet

Syntes:	Referens:
---------	-----------

Triaxial test svensk notation.

Bulkmodul $K=500 \text{ MPa}$ (tryckmodul)

Poissons tal $\nu=0,4$

$$K = \frac{\sigma_v}{\epsilon_v}$$
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

- Inre friktionsvinkel $\phi'=40-45^\circ$ (via ett icke-linjärt spänningsberoende).

Nilsson & Norstedt (1991):

In order to verify the above hypothesis, laboratory testing was performed and calculations of stresses and deformations were made using finite element analysis. The laboratory tests were carried out by triaxial testing (CD-tests) of recompacted large samples (diameter 100 mm, height 200 mm). Hyperbolic parameters as defined in [2] were used to describe the non-linear stress-strain relationships of the material. The parameters were determined for the glacial till, which was compacted to different densities and at different moisture contents. Each series comprised three different confining pressures (50, 100 and 200 kPa).

The results of one series of tests are shown in Fig. 6. During the construction of Stenkullafors Dam, the till was on average compacted at 8 per cent moisture content to a dry density of 1.95 t/m³. The parameters for the till in that state were determined in the laboratory to the values listed below. The parameters for the filters and shell material were selected both from the results of one series of tests with filter material and from parameters presented in [2] and [3].

	Core of glacial till	Filters and shell of gravelly sand
Modulus number, K	500	1 800
Modulus exponent, n	0.40	0.42
Failure ratio, R_f	0.70	0.78
Effective friction, angle, ϕ	42°	42°
Poisson's ratio, ν	0.40	0.30

Confining Pressure, kPa	50	100	200
Moisture content, %	7.2	7.0	7.3
Dry density, t/m ³	1.98	2.02	2.00
Degree of saturation, %	55	56	56
Friction angle, ϕ'	46	42	40
Initial tangent modulus, MPa	91	111	133
Failure ratio, R_f	0.86	0.80	0.90

Appendix II internationell vägledning

MATERIALSPECIFIKATIONER

Syntes:	Referens:
Specifikation tätjord: • Min. 15%<0,063mm ($k < 10^{-6}$ m/s). • Max. 50%<0,063mm. • $D_{\max}$=150-300mm eller $\leq 2/3$ pallhöjd. Våtpackning, "Svenska metoden": • Tjocka lager används för att omgärda stora block 500-600mm. • $D_{\max} \leq 2/3$ pallhöjd. • Finjord ned till 15%<0,063mm avs. 5mm kan tillåtas (lägre än 10% finjord på totalsiktkurvan).	<u>ICOLD (1989):</u> In North America, and to a lesser degree in some European countries, the fines content is emphasized*. A minimum of 15 % is required for a permeability lower than 10^{-6} m/s to be obtained. It is desirable to have a maximum of 50 % of the fines content to avoid difficulties in placing and compaction and to avoid the generation of excessive pore pressures during construction. Moreover, for silty to sandy moraines, the maximum particle size varies between 150 and 300 mm and must not exceed 2/3 of the lift thickness. For clayey moraines where the lift thickness has to be less to allow for better pore-pressure dissipation and compaction homogeneity, the maximum particle size varies between 75 and 200 mm. In Sweden and Norway, where many dams are built during the wet summer season, the wet compaction method is often preferred, since the water acts as a lubricant helping the penetration of large particles into the finer matrix. The tendency is also to use thick layers where fairly large blocks up to 500 to 600 mm in diameter can be buried. In every case however, the boulders are not larger than 2/3 of the lift thickness. The fines content can be as low as 15 % of the 5-mm fraction which could lower the fines content of the total sample to less than 10 %.
• Övergripande för filterdesign: • Tillse nödvändig bredd för filterverkan. • Tillse tillräcklig dränagekapacitet • Bredda filterzonen om	<u>Fell et al (2005):</u> 9.6.1.1 Some general principles The following factors should be taken into account when selecting the dimensions of zones of filters. (a) For filters upstream and downstream of the dam core; - The theoretical width to achieve filtering action (see below); - The discharge capacity required along the filter zone e.g. for chimney drains (see Section 10.3); - The particle size distribution of the filter and the potential for segregation. Wider filter zones should be used if segregation is likely and narrower zones may be used for more uniformly graded materials; - Potential displacement under major earthquake – filters need to be wide enough to remain effective even if displacements occur in an earthquake; - The size of the dam – there is a tendency to use minimum width of 2.5 m or 3 m for very large (>100 m to 150 m high) dams, to allow for differential movement during construction and simply for conservatism;

det föreligger risk för separation. • Beakta möjlig sidorörelse vid risk för jordbävning.	
Filter kan delas in beroende på funktion och betydelse: • Klass I: dränerande filter, normalt dubbla zoner av ensgraderade material. • Klass II: "skyddande" filter, ska skydda basmaterialet, flera zoner av ensgraderat material. • Klass III: "inverterade" filter, lägre krav. • Klass IV: "sprickstoppare", pga. rörelser eller seismisk aktivitet.	<u>FEMA (2011):</u> <i>Drainage filters (class I) – Filters whose purpose is to intercept and carry away the main seepage within a dam and its foundation. These filters may have to remove large amounts of seepage for dams on pervious foundations or dams of poor construction. The filters consist of uniformly graded materials, typically in two stages. The filter must meet the requirements for both particle movement and drainage. Toe drains typically fall into this class.</i> <i>Protective filters (class II) – Filters whose purpose is to protect base material from eroding into other embankment zones and to provide some drainage function in order to control pore pressure in the dam. These filters are typically uniformly graded and in several stages, but they can also be broadly graded in the interest of reducing the number of zones to make the transition to the base material. This class includes chimneys, blankets, and transition zones on the downstream side of a dam.</i> <i>Choke (inverted) filters (class III) – Filters whose purpose is to support overlying fill (the base material) from moving into pervious or open work foundations. These filters are typically broadly graded and have a requirement only to stop particle movement. There is no permeability requirement. Choke filter material is also used in emergency situations in an effort to plug whirlpools and sinkholes.</i> <i>Seismic crack stoppers (class IV) – Filters whose purpose is to protect against cracks that may occur in the embankment core, especially caused by seismic loading and/or large deformations. The dimensions of this class of filter are controlled by expected displacement (horizontal or vertical). While there is no permeability requirement for Second stage filters may also be required for transition to a coarser shell material. This class of filter is typically used for chimneys and transition zones.</i>
• Specifikation tätjord: • Vägraderad morän. • Min. 15% < 0,075 mm avs. < 19 mm.	<u>NVE (2012):</u> Vanlige krav til morenen er at den skal være velgraderet, og at den del av materialet som har kornstørrelse mindre enn 19 mm skal ha et finstoffinnhold på minimum 15 %. Finstoff er her definert som materiale med kornstørrelse mindre enn 0,075 mm.

EROSION OCH FILTERKRAV

Syntes:	Referens:
Filterkrav: • $D_{15}/d_{15} \geq 5$ • $D_{15}/d_{85} < 5$ • Kornkurva filter/bas ska ha samma form. • Månggraderade basmaterial ska designas med filter baserat på basmaterialets kornkurva för -25mm. • Max 5% < 0,075mm kohesionsfri finjord i filtret.	<u>Sherard et al (1963):</u> While there are some slight differences of opinion concerning titative criteria for satisfactory filters, the following rules are used: 1. The 15% size of the filter (i.e., the particle size which is larger than the finest 15% of the soil, D_{15}) should be at least five times as large as the D_{15} size of the soil being protected by the filter. 2. The D_{15} size of the filter should not be larger than five times the D_{85} size of the protected soil. 3. The gradation curve of the filter should have roughly the same shape as the gradation curve of the protected soil. 4. Where the protected soil contains a large percentage of fines, the filter should be designed on the basis of the gradation of the portion of the material which is finer than the 1-in. (25 mm) size. 5. Filters should not contain more than about 5% of fines passing the No. 200 sieve, and the fines should be cohesionless.
Begränsa separation: • $D_{100}/D_{10} < 6$ minskar effektivt separation hos övergångslager.	<u>Ripley (1984):</u> prevented. However, ranges of 1/2–3 in., and 3–10 in. have been found to be effective in practice for gravel cobble sizes. These performance tests suggest that a well-graded transition material of gravel sizes or larger with a $d_{100}:d_{10}$ ratio less than 6 will effectively resist harmful segregation during typical construction operations.
Begränsa separation: • Max 60% > 4,75mm • $D_{max} \leq 50$mm	<u>Sherard et al (1984b):</u> larger D_{50} size. These problems occurred despite careful handling and placement. For conservative practice, and to avoid excessive segregation, no more than 60% of a well-graded sand-gravel critical filter material should be material coarser than the No. 4 sieve. Also, the maximum particle size should be no larger than about 2-in. (50 mm). Successful dams with fine-grained clay cores have had somewhat different filter criteria, but we believe these criteria are reasonable and not too conservative.
Slopa filterkrav som rör D_{50}/d_{50} och D_{15}/d_{15}.	<u>Sherard et al (1984a):</u> Filter criteria that limit the D_{50}/d_{50} and D_{15}/d_{15} ratios are not founded on a sound theoretical or experimental basis and should be abandoned. Some published results of laboratory filter programs include evaluation of test results that have led to unsupportable conclusions and recommendations especially with regard to the criteria employing D_{50}/d_{50} and D_{15}/d_{15}.
Filterkrav: • Filter utan benägenhet för separation: - $D_{max} \leq 18$mm. - Min 60% < 4,75mm.	<u>Ripley (1986):</u> internal stability, for effective filter function. In order to fulfill this function the zone material should have the following properties: (i) a particle size gradation with 'controlling constriction size' that is appropriate in relation to the adjoining upstream zone; (ii) low to nil susceptibility to segregation during the practical operations of handling and placement of the material in the field;

• Tvättad, kohesionslös sand, med sprickstoppande funktion: - Max 2%$<0,075\text{mm}$, men helst inget finkornigare än 0,150mm.	Nilsen 1985; Kjellberg <i>et al.</i> 1985). Recorded dam performance experience and rigorous laboratory test programs have clearly demonstrated that a clean cohesionless sand is not only capable of effectively filtering even the finest of the general range of silt and clay soils found in nature, but that it has the necessary 'crack stopper capability' and the necessary resistance to harmful segregation. An upper limit of particle size to eliminate concern for harmful segregation within a filter sand appears to be 18 mm (3/4 in.), with at least 60% finer than the No. 4 sieve (5 mm). Because the presence of fines imparts undesirable cohesion to a filter sand, the upper limit of fines content in order to have 'crack stopper' capability appears to be 2% minus the No. 200 sieve (0.075 mm), although 0% passing the No. 100 sieve (0.150 mm) is preferable. Recent programs of severe laboratory tests have																									
Morän tillhör materialgrupp 2: sandig silt och ler. • Normalt mindre än 40% sand. • Kohesionslös finjord. • Erosionsförloppet beror av finjorden. • Erfordrar filter med $D_{15}\leq0,7\text{mm}$ för att förhindra erosion.	<u>Sherard & Dunnigan (1989):</u> SANDY SILTS AND CLAYS (SOIL GROUP 2) NEF tests were performed on a large number of different sandy silts and clays having 40–85% passing the No. 200 sieve. Soils of this type are common in nature from many different geologic sources and are widely used in embankment dams. The behavior of the material in these tests was essentially the same as described for the fine silts and clays of soil group 1. The filter boundary D_{15} was always in the range from about 0.6–1.5 mm, with no apparent correlation with the particle size distribution. For the large majority of soils tested, the filter boundary D_{15} was in the range between 0.7–1.0 mm. For these sandy silts and clays, with less than 40% sand sizes, the behavior in the NEF test apparently is dominated by the fines. The tests behaved as though the sand grains were floating in a matrix of fines and could not be mobilized to assist in sealing the filter. This result was some- One of the typical soils in this group is from a broadly graded glacial moraine that contains all particle sizes from cobbles down to clay sizes. Soils like this have been widely used for impervious sections in embankment dams. In this section, we are discussing soils of the type graded generally as shown in Fig. 9. In many places, soils like this are cohesionless, although they contain some clayey fines. For soils from glacial moraines, there has been some question in the industry on the appropriate way to apply current filter criteria. There has been considerable trouble with internal erosion of impervious cores from these soils in many recently constructed dams where coarse filters were used. In this investigation, a great deal of testing was performed on typical broadly graded glacial soils of this type with cohesionless fines, using the NEF test with specimens of various sizes. As a result, it was definitely concluded that it is necessary to use a filter with D_{15} of the order 0.7 mm, or finer, to prevent all internal erosion. Because some of the erosion-damaged dams with soils of this type (Sherard 1979) had sand-gravel filters with D_{15} of two millimeters, it is apparent that the laboratory filter boundary D_{15} of 0.7 mm is not excessively conservative if compared to prototype experience.																									
Omräkna basmaterialet till $\leq4,75\text{mm}$ för att få rätt finjordshalt ($d<0,075\text{mm}$). Filterkrav (40-85%$<0,075\text{mm}$, typiskt moräner): • Filter $D_{15}\leq0,7\text{mm}$ (filtrerande krav). • Filter $D_{15}\geq4d_{15}$ men $\geq0,1\text{mm}$ (dränerande krav). • Filterbandet (fin och grov kurva) ska vara parallella upp till 60% passerande viktmängd med inbördes förhållande 5.	<u>NEH (1994):</u> Table 26-1 Regraded gradation curve data <table><tr><th>Base soil category</th><th>% finer than No. 200 sieve (0.075 mm) (after regrading, where applicable)</th><th>Base soil description</th></tr><tr><td>1</td><td>> 85</td><td>Fine silt and clays</td></tr><tr><td>2</td><td>40 – 85</td><td>Sands, silts, clays, and silty & clayey sands</td></tr><tr><td>3</td><td>15 – 39</td><td>Silty & clayey sands and gravel</td></tr><tr><td>4</td><td>< 15</td><td>Sands and gravel</td></tr></table> Table 26-2 Filtering criteria — Maximum D_{15} <table><tr><th>Base soil category</th><th>Filtering criteria</th></tr><tr><td>1</td><td>$\leq 9 \times d_{85}$ but not less than 0.2 mm</td></tr><tr><td>2</td><td>$\leq 0.7 \text{ mm}$</td></tr><tr><td>3</td><td>$\leq \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) [(4 \times d_{85}) - 0.7 \text{ mm}] + 0.7 \text{ mm}$ $A = \% \text{ passing \#200 sieve after regrading}$ (If $4 \times d_{85}$ is less than 0.7 mm, use 0.7 mm)</td></tr><tr><td>4</td><td>$\leq 4 \times d_{85}$ of base soil after regrading</td></tr></table>	Base soil category	% finer than No. 200 sieve (0.075 mm) (after regrading, where applicable)	Base soil description	1	> 85	Fine silt and clays	2	40 – 85	Sands, silts, clays, and silty & clayey sands	3	15 – 39	Silty & clayey sands and gravel	4	< 15	Sands and gravel	Base soil category	Filtering criteria	1	$\leq 9 \times d_{85}$ but not less than 0.2 mm	2	$\leq 0.7 \text{ mm}$	3	$\leq \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) [(4 \times d_{85}) - 0.7 \text{ mm}] + 0.7 \text{ mm}$ $A = \% \text{ passing \#200 sieve after regrading}$ (If $4 \times d_{85}$ is less than 0.7 mm, use 0.7 mm)	4	$\leq 4 \times d_{85}$ of base soil after regrading
Base soil category	% finer than No. 200 sieve (0.075 mm) (after regrading, where applicable)	Base soil description																								
1	> 85	Fine silt and clays																								
2	40 – 85	Sands, silts, clays, and silty & clayey sands																								
3	15 – 39	Silty & clayey sands and gravel																								
4	< 15	Sands and gravel																								
Base soil category	Filtering criteria																									
1	$\leq 9 \times d_{85}$ but not less than 0.2 mm																									
2	$\leq 0.7 \text{ mm}$																									
3	$\leq \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) [(4 \times d_{85}) - 0.7 \text{ mm}] + 0.7 \text{ mm}$ $A = \% \text{ passing \#200 sieve after regrading}$ (If $4 \times d_{85}$ is less than 0.7 mm, use 0.7 mm)																									
4	$\leq 4 \times d_{85}$ of base soil after regrading																									

- Filter ska ha $C_u = D_{60}/D_{10} \leq 6$ (förhindra språnggradering).
- Filter $D_{\max} \leq 75\text{mm}$ och $D_5 \geq 0,075\text{mm}$ (oplastisk).
- För filter $D_{10} < 0,5\text{mm}$, 0,5-1,0mm, så bör $D_{90} \leq 20\text{-}25\text{mm}$ (för att förhindra separation).

Table 26-3 Permeability criteria

Base soil category	Minimum D_{15}
All categories	$\geq 4 \times d_{15}$ of the base soil before regrading, but not less than 0.1 mm

Table 26-4 Other filter design criteria

Design element	Criteria
To prevent gap-graded filters	The width of the designed filter band should be such that the ratio of the maximum diameter to the minimum diameter at any given percent passing value $\leq 60\%$ is ≤ 5
Filter band limits	Coarse and fine limits of a filter band should each have a coefficient of uniformity of 6 or less
To prevent gap-graded filters—	Both sides of the design filter band will have a coefficient of uniformity, defined as:
	$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 6$

Table 26-5 Maximum and minimum particle size criteria*

Base soil category	Maximum D_{100}	Minimum D_5 , mm
All categories	≤ 3 inches (75 mm)	0.075 mm (No. 200 sieve)

* The minus No. 40 (425 mm) material for all filters must be nonplastic as determined in accordance with ASTM D 4318

Table 26-6 Segregation criteria

Base soil category	If D_{15} is:	Then maximum D_{90} is
	(mm)	(mm)
All categories	< 0.5	20
	0.5 - 1.0	25
	1.0 - 2.0	30
	2.0 - 5.0	40
	5.0 - 10	50
	> 10	60

För basmaterial med $>15\% < 0,075\text{mm}$ så bör det undersökas om lerpartiklar är *dispersiva* eftersom filterkrav baserat på D_{15} då ej är representativa.

Permeabilitetskrav:

- Filter $D_{15, \min} \geq 3 \cdot d_{15}$, dock min 0,1mm.

Förhindra språnggradering:

- $D_{15, \min}/D_{15, \max} < 5$
- $2 < D_{60}/D_{10} < 6$

FEMA (2011):

For base soils with more than 15% fines, adequate tests should be performed to establish whether the clay fines are dispersive in character. The crumb test (ASTM D 6572) and double hydrometer test (ASTM D 4921)

As the name implies, dispersive clay minerals tend to "come apart" when immersed in fresh water, as opposed to flocculation (come together), which is seen in all other types of clays. This dispersion tends to make the nominal particle sizes effectively smaller than what is measured in non-dispersive samples. Since the effective particle sizes are smaller, the retention rules based on a D_{15} size are not entirely representative. A different

Step 6: To satisfy permeability requirements, determine the minimum allowable D_{15F} :

Minimum $D_{15F} \geq 5 \times$ maximum D_{15B} (Reclamation)

Minimum $D_{15F} \geq 3$ to $5 \times$ maximum D_{15B} (USACE)

Minimum $D_{15F} \geq 4$ to $5 \times$ maximum D_{15B} (NRCS)

Minimum D_{15F} is computed prior to any re-grading, if any, and should not be smaller than 0.1 mm.

Step 7: Limit the width of the filter band and prevent gap-graded filter design. After plotting the maximum and minimum D_{15F} sizes on the preliminary design gradation plot, check that their ratio is less than or equal to 5 (i.e., maximum $D_{15F} < 5 \times$ minimum D_{15F}). In addition, check the D_{10} and D_{60} size limits to ensure coefficient of uniformity (C_u) between 2 and 6.

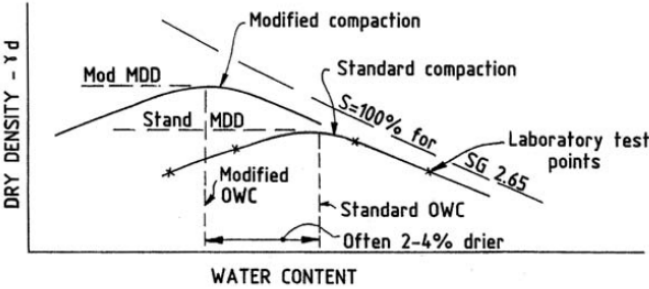
Begränsa finjord och för stora partiklar: • $D_{100, \min} \leq 51 \text{ mm}$ • $D_5 \geq 0,075 \text{ mm}$ (oplastisk) • Max 3% < 0,075 mm (för att beakta uppkrossning)	Step 8: To limit the amount of fines and oversized material, determine the minimum D_{5F} and maximum D_{100F} according to the following table: Table 5-3. Maximum and minimum particle size criteria. <table><tr><th>Base Soil Category</th><th>Maximum D_{100F}</th><th>Minimum D_{5F}</th></tr><tr><td>ALL categories</td><td>$\leq 2 \text{ in.}$ (51 mm)</td><td>0.075 mm (No. 200 sieve)</td></tr></table> USACE sets maximum size at 3 in. (75 mm), maximum 5% fines passing the No. 200 sieve, and PI equal to zero. Filter fines The three agencies' criterion for percent finer than the No. 200 sieve are similar. The basic requirement is that filters should have less than 5% finer than the No. 200 sieve. Reclamation adds a requirement that filter materials in the stockpile (i.e., before being compacted) must have 3% or less fines because some breakdown of the filter during construction is assumed, which will increase the percentage of fines.	Base Soil Category	Maximum D_{100F}	Minimum D_{5F}	ALL categories	$\leq 2 \text{ in.}$ (51 mm)	0.075 mm (No. 200 sieve)
Base Soil Category	Maximum D_{100F}	Minimum D_{5F}					
ALL categories	$\leq 2 \text{ in.}$ (51 mm)	0.075 mm (No. 200 sieve)					
Filter permeabilitet: $\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4-5 \rightarrow \frac{k_{\text{filter}}}{k_{\text{bas}}} > 1$ men alltid $D_{15} \geq 0,1 \text{ mm}$. • Max 2% < 0,075 mm (oplastisk).	Fell et al (2005): 9.2.2.3 Permeability The filter must be sufficiently permeable for the seepage flow to pass through it without significant build up of pressure. This has been taken into account by using the criterion $D_{15F}/D_{15B} \geq 4$ or 5, which ensures that the permeability of the filter is 15 to 20 times that of the soil. However just as important is to keep the fines content (silt and clay sized particles) to a minimum. Table 9.5. Permeability criteria. <table><tr><th>Base soil category</th><th>Criteria</th></tr><tr><td>All categories</td><td>Minimum $D_{15F} \geq 4 \times D_{15B}$ of the base soil before regrading, but not less than 0.1 mm; $\leq 2\%$ (or at most 5%) fines passing 0.075 mm sieve in the filter; fines non plastic</td></tr></table>	Base soil category	Criteria	All categories	Minimum $D_{15F} \geq 4 \times D_{15B}$ of the base soil before regrading, but not less than 0.1 mm; $\leq 2\%$ (or at most 5%) fines passing 0.075 mm sieve in the filter; fines non plastic		
Base soil category	Criteria						
All categories	Minimum $D_{15F} \geq 4 \times D_{15B}$ of the base soil before regrading, but not less than 0.1 mm; $\leq 2\%$ (or at most 5%) fines passing 0.075 mm sieve in the filter; fines non plastic						
Övergripande filterkrav: • Filtrerande. • Dränerande. I övrigt ska filtret: • ej separera. • ej nedbrytas. • ej uppvisa skenbar eller verklig kohesion. • vara inre stabilt. • ha tillräcklig dränagekapacitet. • kunna hantera en koncentrerad läcka. Filter och dränsystem ska kunna ta hand om allt läckage som kommer till dammtån (dvs. portryckslinjen ska ej överstiga nedströms dränagenivå). Värsta scenario ska beaktas: • Spricka i tät kärnan.	USSD (2011): 4.2 UNDERLYING PRINCIPLES 4.2.1 Basic Requirements of Filters and Drains in Dams Two fundamental functions are required of filters and drains in earth, earth-rock, and rockfill dams: 1. Retention function: The filter must prevent migration of soil particles from the classic Terzaghi criterion $D_{15}/d_{85} < 4$ addresses this requirement. In this 2. Permeability function: The filter must accept seepage flows from adjacent To achieve the above functions, the ideal filter or filter zone will • Not segregate during processing, handling, placing, spreading or compaction. • Not change in gradation (degrade or break down) during processing, handling, • Not have apparent or real cohesion or the ability to cement as a result of chemical, physical or biological action. The filter must remain cohesionless so • Be internally stable, that is, the coarser fraction of the filter with respect to its • Have sufficient discharge capacity such that seepage entering the system is • Have the ability to control and seal a concentrated leak through the core. The 4.4.4 Discharge Capacity It is imperative that filter and drainage systems within embankment dams safely conduct all seepage water to the downstream toe or to an adjacent more pervious zone without the buildup of excess pressure. Design of drainage systems should consider a worst-case scenario that includes core cracking, hydraulic fracture, and/or core segregation. With ample discharge capacity, the line of seepage will not rise above the horizontal downstream drain connected to the chimney drain. In his response to the questionnaire "...While there are a number of ways of analyzing flow in filters and drains, one of the simplest to use (after potential flow rates have been estimated) is Darcy's law in the form: $Q/i = kA$ "In this equation, Q is the estimated rate of flow which must be handled by the filter or drain (per unit length of structure), i is the allowable (available) hydraulic gradient in the filter or drain, k is the required coefficient of permeability of the filter or drain having an area, A, normal to the direction of flow in the filter or drain. Any						

• Hydraulisk uppsprickning. • Separation av tätjord.	
Filtret ska vara fri från kohesion och plasticitet. Filterseparation begränsas genom: • $D_{100} < 50\text{mm}$. • $D_5 > 0,075\text{mm}$.	<u>NVE (2012):</u> Filtermaterialet skal være kohesjonsfritt, dvs. at materiale som passerer sikt nr. 40 (mm) ikke må være plastisk, i følge ASTM (The American Society for Testing and Materials). Ved innbygging av filtermateriale i dammen skal det ikke kunne oppstå lokale part med ansamling av grove eller fine korntørrelser. For alle typer basismateriale skal følgende to kriterier være oppfylt av filtermaterialet: $D_{100} < 50\text{ mm}$ og $D_5 > 0,075\text{ mm}$ (begrensningen av finstoffinnhold har betydning for intern st ved komprimering)

PACKNING OCH PACKINGSFÖRFARANDE

Syntes:	Referens:
<u>Våtpackning, "svenska metoden"</u> Utförandekontroll: • Tåtjorden är för blöt om traktorn sjunker djupare än 300mm. • Tåtjorden är för torr om traktorn sjunker mindre än 30mm.	<u>Sherard et al (1963):</u> In these Swedish dams the cores, which have consisted usually of glacial moraines in the form of gravelly sands with silty fines, are compacted at a water content so high that the construction surface is too soft to support the travel of heavy rubber-tired hauling equipment or any kind of heavy rollers. The impervious material is dumped on the construction surface adjacent to the core and pushed to the core zone with bulldozers. It is then compacted by crawler-type tractors, which in some cases have to travel rapidly in order to avoid bogging down. For construction control the material is considered too wet if a rapidly moving, heavy tractor penetrates the construction surface more than about one foot and too dry if it does not penetrate more than 1 in., Fig. 11.3:21a.
Våtpackning ger betydligt lägre densitet än max torrdensitet erhållet vid labpackning (Proctor) men praktiskt taget lika permeabilitet som vid sedvanlig packning vid optimal vattenkvot.	The density of the core material using this method of construction is, of course, considerably lower than the Proctor maximum density; however, the permeability is practically the same as if it were constructed with heavy rollers at the optimum water content. (Ref. 442).
Typiskt packningsutförande: • 200-300mm pallar. • 3-5 överfarter med bandtraktor. • Min 15% $> 0,075\text{mm}$. • Knapp kontroll av densitet utförs normalt.	1. An effort is usually made to spread the material in layers 9 to 12 inches in thickness, though it is difficult to control the layer thickness since tractors sink 12 in. or more into the construction surface. Specifications usually call for three to five coverages of the tread of a D-7 tractor over each point on the construction surface. 2. Little or no control of the density of the core is attempted. It is impossible to use calibrated sand tests since the soft material squeezes together and reduces the volume of the hole by an

• Sättning förekommer under utförandet och efter. • Leder till porvattenttryck som nästan uppgår till jordens överlagringstryck.	3. Primary emphasis in the construction control is on the permeability of the core material. Generally, a specification is used that the material shall not contain less than 15% by weight finer than the No. 200 sieve. 4. One major design problem is the settlement of the core during and after construction. The magnitude of the settlement depends to a great extent on the soil type. At the high Messaure Dam in Switzerland, 400 m high. 5. Pore water pressures equaling nearly 100% of the overlying embankment weight generally are measured soon after the installation of the piezometers. However, because the cores are generally made thin, fairly rapid dissipation occurs. 6. In Sweden, zones of the embankments near concrete structures and steep rock abutments are compacted by the more conventional techniques with the water content near Proctor optimum in order to minimize differential settlements. In Norway, at the 60-meter-high Arestadalen Dam, the wet silt core was compacted
Morän i vått/vattenmättat tillstånd leder till ökad rörlighet (deformerbarhet) hos materialet och på så vis minskad mottaglighet för sprickbildning och valvverkan (och därmed hydraulisk uppspräckning). Packningsföreskrifter: • Internationellt: min. 97-98% av Standard Proctor max torrdensitet. • Skandinavien: min 95% Modifierad Proctor (tung labpackning) max torrdensitet. Erfarenhet visar att maximal packning uppkommer på 0,2-0,3m djup. På ytan blir packningen sämre pga. sprickbildning tvärs färdriktningen från vältarna. Fullskaletester på packning och utläggning bör utföras.	<u>ICOLD (1989):</u> Placing the moraine in wet or even in saturated conditions has the following advantages : — greater embankment deformability during construction and impounding of the reservoir, thus reducing the possibility of cracking the impervious zone; — greater embankment deformability which reduces the arching phenomenon and thus the danger of hydraulic fracturing. as a percentage of the maximum Standard Proctor density. A minimum of 97 to 98 % Standard Proctor is generally required, except in Scandinavia where 95 % of the Modified Proctor is used. To reach this goal, the design normally specifies the lift thickness, the range of water content for compaction, the type of compaction equipment and sometimes the number of passes. In one case (91), 100 % Standard According to curves, maximum compaction occurs at a depth of 0.2-0.3 m. The reduced compaction in the upper part of the layer can be explained by cracking produced by vibrating rollers, to a depth of about 5 cm and perpendicular to the direction of travel. Full-scale tests both on the compaction of the material as well as the placing operation have to be carried out.
Praxis packningsförfarande: • Min 98% packningsgrad av	<u>Fell et al (2005):</u>

Standard Proctor max torr densitet, vid: - $(w_{opt}-1\%) < w < (w_{opt}+1\%)$, alt. - $(w_{opt}) < w < (w_{opt}+1\%)$. Standard Proctor max torr densitet bör användas, inte Modifierad Proctor, eftersom: • Standard Proctor packning ger låg permeabilitet och samtidig hög flexibilitet (pga. våtare packning). • Modifierad packning innebär hårdare kompaktering med högre densitet men kan resultera i sprödare fyllning och högre permeabilitet.	<i>Density ratio, water content and layer thickness</i> It is common practice to specify a density ratio $\geq 98\%$ of standard maximum dry density, with a water content between $OWC - 1\%$ and $OWC + 1\%$, or OWC and $OWC \pm 2\%$, where OWC is standard compaction optimum water content. It should be noted that: - Standard, not modified compaction should be used. This is to ensure moist compaction which leads to low permeability, flexible fills. Compaction at around modified optimum water content leads to high densities, but the soil structure is likely to be aggregated, leading to a higher permeability and more brittle fill. Recent studies (Wan and Fell, 2002, 2003) show dry compaction also is likely to result in clay soils which are more erodible than if they are compacted wet of optimum. 
<u>Filterpackning, övergripande anvisningar</u> Tillräcklig densitet genom packning bör uppnås för att: • Borträkna liquefaction. • Begränsa sättningar. • Öka hållfastheten. Överdriven packningen kan dock leda till: • Uppkrossning av partiklar. • Ökad finjord. • Minskad permeabilitet. Vägläddning filterpackning:	<u>CDA (2007):</u> It is recognized that filter materials should be compacted to sufficient density to preclude liquefaction, limit settlement, and generate strength. Excess compaction, however, can cause particle breakdown resulting in an increase in fines greater than the specified limit thus reducing permeability. As a general guideline, a minimum relative density, $RD=70\%$ is suggested.

• Min. packningsgrad 70%.	
Specifikation filterpackning: • Torrdensitet minst 70% av <i>Maximum Index Density using vibratory table</i>.	FEMA (2011): The end-result type of compaction specification requires the filter/drain zone to be placed to either (1) a required% compaction or (2) a required relative density. The contractor determines what equipment and mode of operation are needed to accomplish the requirement. Other requirements are often included in the end-result type of specification, such as maximum permissible loose lift thickness. One example of this type of specification is to require in place material for a filter/drain to have a dry density that corresponds to at least 70% of relative density as determined by ASTM D4253 and D4254.
Föreskrifter morän Utläggning: • Morän läggs ut i horisontella lager i fastställd tjocklek, dock max 0,5m. • Mot berg och betong läggs moränen ut i max tjocklek 0,1m, med väl fuktad kontaktyta, $D_{max} \leq 30\text{mm}$. Packning: • Packning utförs vid $(w_{opt}-2\%) < w < (w_{opt}+2\%)$ av Standard Proctor optimal (för första kontaktlaget ska det ligga i det övre spannet). • Packning med 8 överfarter / min 8T vibrovält / max 0,5m pallhöjd. • Om hög naturlig vattenkvot ($> w_{opt}+2\%$) så utförs traktorpakning / 6-8 överfarter / min 15T / max 0,25m pallhöjd. Olämpligt att skifta från traktorpakning till vibrovält eftersom	NVE (2012): Utläggning av morene skal skje i horisontale lag av fastsatt tykkelse, men ikke tykkere enn 0,5 m. I spesielle tilfeller kan morenen legges ut med en jevn helning langs damaksen på opptil 1:5. Utläggning mot fjell eller betong skal foretas i lag med maksimal tykkelse på 0,1 m, etter at fjellet eller betongen er godt fuktet. Det forutsettes at fjellet eller betongen har temperatur over 0 °C, slik at fuktingen ikke medfører isdannelse. Massene skal ikke inneholde stein med større diameter enn 30 mm. Utlæggingen mot fjell bør alltid ligge Ved utlæggingen skal vanninnholdet i morenen ligge innenfor fastsatte grenser, for eksempel vanninnholdet ved Proctor Standard optimum ± 2 prosentenheter. Ved innbygging av tetningsmasser mot fjell eller betong skal vanninnholdet ligge nær opptil det maksimalt tillatte. Komprimering av morenen kan foretas med vibrovalse eller bulldoser med traktorpakking, og bør foretas snarest mulig etter at massene er lagt ut i lag på dammen. Ved komprimeringen bør filtersonene ligge minst like høyt som tetningssonen. Etter komprimeringen skal massene tilfredsstillende angitte krav til lagringstetthet, for eksempel ved at minimum tørr romvekt eller maksimal luftporeprosent fastsettes i forhold til tilsvarende verdier ved Proctor Standard optimum. Vanligvis vil et slikt krav oppfylles ved at massene komprimeres ved 8 overfarter med en vibrovalse på minst 8 tonn, ved lagtykkelse 0,5 m. Kjøreastigheten fastsettes på grunnlag av vibrasjonsutstyrets spesifikasjoner. Dersom morenemassene har et naturlig vanninnhold over $w_{opt}+2\%$, kan det være en løsning å bare benytte traktorpakking. Morenen legges da ut i lag på 0,15-0,25 m, og komprimeres ved 6-8 passeringer med en bulldoser med traktorpakking på minst 15 tonn. Fordelen med denne metoden er at steinrik morene kan eltes bedre, sammenlignet med valsepakking. En ulempe er at man ikke kan skifte over fra traktorpakking til komprimering med vibrovalser, i hvert fall ikke innen samme byggesesong. Dette er begrunnet med at de relativt bløte underliggende massene kan føre til sprekkdannelse i de overliggende "stivere" massene. Mot fjell eller betong skal morene legges ut i lag på maksimalt 0,1 m og komprimeres med lett vibroutstyr.

det skapar blött underliggande lager och sprickbildning i ovanliggande styvare lager.	
---	--

GRUNDLÄGGNING OCH PACKNING

Syntes:	Referens:
Grundläggning/anslutningar: • Ojämnheter på berggrundsytan kan leda till differentialspänningar och sprickbildning. • Överhäng ska bortskaffas och utskjutande berg ska avjämnas. • Sprängning undviks för att inte skada friskt berg. • Anslutningar/anfang bör formas med gradvis ändring i lutning (speciellt viktigt när material med stor skillnad i deformationsegenskaper används). • Om det föreligger risk för dragspänning bör materialzoner breddas för att öka möjligheten för självläkning av sprickor.	<u>Jansen (1988):</u> proved. Irregular rock surfaces in the foundation increase the potential for differential strain and consequent embankment cracking; so careful attention to foundation shaping under the core and the adjoining transitions is necessary. Overhangs should be eliminated, and rock protuberances should be trimmed. To preclude disturbing acceptably sound foundation rock, this excavation preferably should be done without blasting. In conjunction with rock excavation for protection. While the benefits of this may be argued, there should be no question of the value of sealing foundation openings with grout or concrete to isolate the embankment from potentially damaging underflow. In common practice on many projects, this is accomplished effectively with slush grout, mortar, dental concrete, or shotcrete. An additional line of defense is provided by filters and drains in the downstream part of the embankment. Shaping of abutments to provide gradual changes in slope is particularly important where materials with a large difference in deformation modulus must be used, such as rockfill and a sloping clay core with a high moisture contents are sometimes used. At potential tension zones, the core and its adjacent transitions and filters may be broadened so that any cracks that develop will heal more readily. In some projects, selected soils or blended soil
• Jordgrundläggning av morän: • På fast, orört material med densitet och permeabilitet minst lika som tätjorden. • Normalt har naturlig morän mycket hög densitet (t.f.a. bildningssätt) och löst, genomsläppligt material är oftast begränsat till ytan av formationen.	<u>ICOLD (1989):</u> 4.2. IN THE FOUNDATION An acceptable moraine foundation for embankment dams is defined in general as a firm undisturbed material having a density and an imperviousness equal to or greater than that of the overlaying compacted impervious zone of the dam. Thus, loose and pervious materials are removed from under the core and filter areas. Moraine under the shell area, free from organic or other undesirable soft It should be mentioned that the moraine <i>in situ</i> exhibits in general a very high density, due to its consolidation under the weight of the glacier. Consequently the presence of loose and pervious material is limited to the upper part of the formation

Avjämningsgjutning blev praxis först 1960-1970.	Fell et al (2005):
Innan 1960 finns alltså ökad risk för lösa/mjuka partier/zoner vid kontaktytan mellan tätkärna och berggrund.	When assessing the likelihood of internal erosion and piping of existing dams, a thorough assessment should be made of what foundation preparation was carried out. This can be assessed from construction reports, specifications and most particularly from photographs taken during construction. While it was common practice to carefully clean up (of loose material) the cutoff foundation in earlier dam construction, it was not until around the 1960s to 1970s that extensive use was made of dental concrete. Hence many dams built before then have the potential for loose/softened zones of core material near the contact between embankment and foundation. These have been detected in some dams using cone penetration tests through the earthfill.

UTFÖRANDE, TÄTJORD OCH FILTER

Syntes:	Referens:
Utförande: • Processa tätjorden så att $D_{\max} < 50\text{mm}$ för att minska separationsbenägenheten. • Lämpligt att säkra grundanslutningen med betongplatta som täcker in kontaktytan mot berg för tätkärna och filterzonen.	<u>Leps (1979):</u> tests. The practical solution is to require enough processing of core soils to eliminate the coarser fraction, say the plus 5 cm sizes. This can be simply achieved for non-plastic soils by use of either a vibrating grizzly or a jaw crusher. It should be supplemented on the fill by required disk and harrowing to provide reasonable blending. the extent that on a number of projects where the writer has been involved it has been found both prudent and economic to specify a complete, unreinforced, concrete slab over the full width and length of contact area of the core and filters.
Design av dammlinje för att reducera mottaglighet för tvärsprickor: • Gradvis kurvändring. • Konvex uppströms form.	<u>Jansen (1988):</u> In usual practice, the alignment of an earthfill is designed to conform optimally with the topographical and geological conditions of the site. Thin abutment ridges are avoided if possible. Any changes in the centerline preferably should be gradual so that the potential for transverse cracking is minimized. At some narrow sites, embankments have been curved with convexity upstream to introduce longitudinal compression under reservoir loading, thus reducing susceptibility to transverse cracking.
Utförande, erfarenhet:	<u>Fetzer (1988):</u>

• God packning har uppnåtts invid betonganslutningar genom att utföra överfarter parallellt mot ytan. • Densitetsprover bör tas i varje pall vid anslutningarna. • Pallhöjder/lagertjocklekar bör kontrolleras och dokumenteras.	ing compacted layer arches over the void. Good compaction against abutments and structures has been obtained by rolling parallel to steep abutments and structures with the front tires of loaded, front-end loaders; the tires can rub against abutment and structure faces without damaging the rock or concrete. The production rate with this equipment is sufficient to keep up with the remainder of the embankment. In confined areas such as narrow back-fill areas next to an outlet structure, hand-held mechanical tampers or other special compaction equipment may be required. Regardless of the compaction equipment used, several densities should be taken in each lift against the faces of abutments and structures to ensure that the required density is being achieved. sometimes repeatedly, by pneumatic-tired rolling equipment. The thickness of each lift placed should be measured and recorded; otherwise, the lifts will be placed excessively thick. Disking and blading of each loose lift is usually required to break up large lumps and to provide a more uniform surface for compaction. The surface of the fill should be sloped to drain toward the shoulders, and the slope should always be away from inclined drains and filters to prevent fines from being washed into the drainage system.
Design av filterzonen: • Ensgraderade material (minskad risk för separation). • Tvättad, kohesionslös sand (max 2% < 0,075mm, helst 0% < 0,150mm) Design, filterkomponenten: • Sand -12mm. • Grus 12-75mm • Sten 75-200mm.	Ripley (1984): contact area. Processed materials were used in the filter-transition zones, sand minus 1/2 in., gravel 1/2 to 3 in.; and rock 3 to 10 in., respectively, proceeding away from the core. The specified narrow gradation for each of these zones had the practical and essential property that the materials were not susceptible to harmful segregation during dumping and spreading operations. Moreover, the materials used in the sand filter zones were clean and cohesionless, minimizing the susceptibility of the sand to sustain an open crack through which core fines could pass. This sirable cohesion to a filter sand, the maximum fines content in order to have "crack-stopper" capability appears to be 2% minus #200 sieve, although 0% passing the #100 sieve is preferable. A recent program of
Piping motverkas genom att: • 2-zons filterkomponent uppströms om tätkärnan. • 3-zons filterkomponent nedströms tätkärnan. • Betongtäckning av hela kontaktytan mellan tätkärna och berggrund.	Ripley (1984): other Alcoa dams between 1940 and 1955, Growdon's defensive measures to prevent piping of core material had been shown to be fully effective (three papers by Growdon in Ref. 1). The measures consisted of: A 2 zone filter-transition component on the upstream side of the core; a 3 zone filter-transition component on the downstream side of the core; and careful blanket and curtain grouting of bedrock beneath the core contact area. Processed materials were used in the filter-transition zones, sand minus 1/2 in., gravel 1/2 to 3 in.; and rock 3 to 10 in., respectively, proceeding away from the core. The specified narrow gradation for each of these zones had the practical and essential property that the materials were not susceptible to harmful segregation during dumping and spreading operations. Moreover, the materials used in the sand filter zones were clean and cohesionless, minimizing the susceptibility of the sand to sustain an open crack through which core fines could pass. This Ripley (1986):

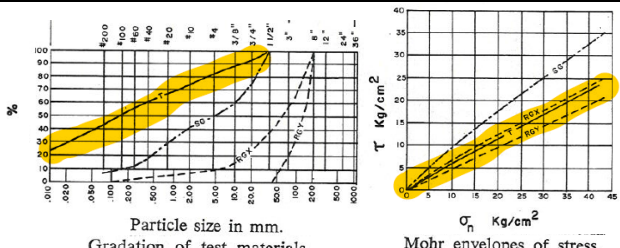
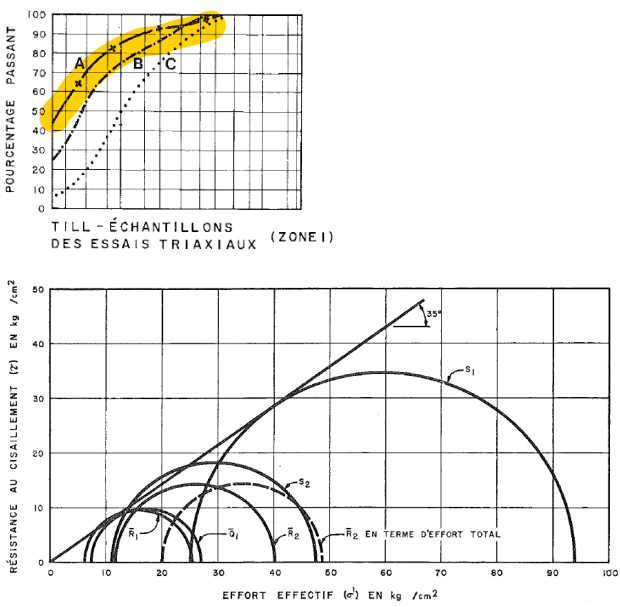
	Effective defensive measures against piping of core material include : first, a shotcrete cover on the entire core-bedrock contact to prevent migration of core fines into or along fractures in the bedrock where the contact exhibits significant fractures; and second, one or more narrowly graded filter-transition zones downstream of the core, that are not subject to harmful segregation during the practical operations of handling and placing them. The filter next to the core should consist of clean cohesionless sand. Neither of these measures is unduly costly and together they provide a virtual foolproof defense against downstream piping of any of the common core materials.
Design filterkomponent: • Månggraderade enkelfilter undvikes, flera ensgraderade filterzoner rekommenderas istället. • Filtermaterialet bör kontrolleras att det kollapsar vid uppfuktning.	Milligan (2003): • The use of single, widely graded one-stage filters should be avoided; multistage, narrowly graded filters are recommended; • A uniform sand, with a maximum size not exceeding 30 mm and a D_{15} size less than 0.7 mm, is recommended as the preferable downstream filter for most core materials, provided it is wetted during placement in order to inhibit segregation; • Filters should be tested for desirable collapse on wetting by laboratory tests during the design stage and by field tests during construction; and
<u>Övrigt, erfarenheter</u> Sprickor/läckanvisningar troligast vid: • Övre delen av dammen. • Branta grundanslutningar eller ojämnheter i grunden. • Genomföringar. • Vid betonganslutningar. • Trånga, branta tätdiken. Uppkrossning av filtermaterial bör beaktas eftersom finjordshalten kan öka 1-3% från täkt till utläggning. Jordprover bör tas av utlagt, packat filtermaterial. Tekniken <i>utbladning</i> av filtermaterial bör	FEMA (2011): Cracks or other preferential flow paths are more likely at the following locations: • Upper part of the embankment • Overly steep abutments or above abrupt changes in the foundation or abutment profile • At the embankment/abutment contact • At the embankment/foundation contact • Around and above a conduit or other structural penetration through the embankment • At the contact between the embankment and spillway or abutment wall • Narrow and/or steep cutoff trenches • Avoid using excess quantities of material caused by spreading of sand material during compaction • Minimize particle breakdown what is in place in the embankment. The Bureau of Reclamation (Reclamation) has been monitoring breakage between the source and the in-place fill on construction projects for the past 30 years by performing gradations at both points. Results of these gradations indicate particle breakage typically results in an increase in fines of between 1 and 3%, with 2% being typical for materials in the Western United States. It should be noted that generally source material from a crushing operation will experience greater breakdown than processed pit-run. Based on these data, gradations produced at the source should be 2% less than that desired in the embankment. When specifying material gradations at the processing plant, particle breakage should be taken into account and gradation tests run on in-place material. When material gradation is specified only for the Basic construction procedures commonly employed to construct sand filters/drains are: • Horizontal and vertical control • Storage (stockpiling) of materials • Loading of hauling equipment • Hauling and dumping • Spreading to specified loose lift thickness • Wetting • Compaction • On-site and laboratory testing Since spreading dumped material by blading inherently causes segregation and possibly contamination, blading should be kept to a minimum. Blading is usually accomplished by graders or dozers, as shown in Figure 7-13, with tracking off the filter kept to a minimum in order to lessen the chances of contamination. To minimize segregation, spreading equipment should be operated at minimum speeds and tracking on the filter minimized. Some hand work may be required in addition to blading.

minimeras, använd hellre spridarlåda (spreader box).	One device for spreading sand filter/drain material that has been used on several jobs is a spreader box , as shown in Figure 7-14. Material is dumped into the spreader box bin , which is then pulled or pushed (depending on the particular operation) along the axis of the filter/drain zone. As the spreader box moves, material feeds out the rear of the box, releasing material at the specified loose lift thickness and width . Use of this device can be somewhat cumbersome, but is usually worth the extra effort as no blading or trafficking by equipment (other than by the prime mover for the box) is required to place the filter/drain material in the exact loose lift thickness and zone width. Several variations of spreader boxes have been
Smala filter är olämpliga. Min bredd är 2-3m.	USSD (2011): segregation. "Narrow filters are difficult to place except in a vertical trench or with spreader box and are not accepted in a most critical earth dam (effect of 'Christmas tree' boundary) and generally the minimum practical recommended width varies between 2 and 3 m or even more in special cases (earthquake areas)" (private communication, Georges Post, 1993). Use of wide transition zones with broad material gradation such as unprocessed material from natural deposits, should be avoided. These less controlled materials will suffer segregation during placement and are likely to vary in gradation and quality , such variations are especially critical at the interface with adjacent material.
Filter $D_{\max} = 75\%$ av lagertjocklek.	BOR (2012) (13,10): 10.5.1.3.6 Oversized Materials The maximum diameter of stone or cobble material allowed in compacted fill is generally limited to about 75 percent of the thickness of the compacted layer .
Utformning av tätkärna: • Min 4m bredd vid dämningssgränsen. • I övrigt min $(4m+H/3)$.	NVE (2012): 3.3.1 Morene Tetningskärner av morene eller andre egnede løsmasser utformes som en bred og sentral kjerne, eller som en smal kjerne som vanligvis plasseres skråstilt mot oppstrøms side. En tetningskjerne skal være minst 4,0 m bred i nivå med HRV, men kan i toppen reduseres til 2,0 m, jf. kap. 3.2.2. Bredden av morenekjernen skal økes med dybden og bør minimum være $4\text{ m} + 1/3$ av vannhøyden til dimensjonerende vannstand.

ÖVRIGT

Skjuvhållfasthet – fallstudier

Syntes:	Referens:
Kända materialparametrar för morän: • Baserat på triaxialförsök på morän med $D_{\max}$ 37mm. • Inre friktionsvinkel $\phi' = 34^\circ$ med endast små variationer pga vattenkvot inom spannet $w_{\text{opt}} \pm 2\%$.	Webster (1970): a. <i>Glacial Till - Area A.</i> — On the basis of the minus 20 mm (3/4-in.) size, the coefficient of permeability was found to be about 10^{-7} cm/sec and the average maximum dry density and optimum moisture content were found to be 2 150 kg/cm³ (134.4 pcf) and 9 % respectively. The average natural moisture content was found to vary from 12 % at 0.6-m (2-ft) depth to 9 % at 3.7-m (12-ft) depth. The average liquid and plastic limits, based on the minus 0.5-mm (No. 40) size are 26 % and 21 % respectively. Triaxial tests with confining pressures up to 32 kg/cm² (450 psi) were made on the mean gradation of the minus 3.7-cm (1-1/2-in.) material on samples 15 cm (6 in.) in diameter. A series of these tests was discussed by Insley and Hillis (1965) [4]. In the drained condition the peak strengths were essentially constant at $\phi_{\text{max}} = 34^\circ$, with only minor variations for changes of moisture content within $\pm 2\%$ of optimum.

	 Particle size in mm. Gradation of test materials. τ Kg/cm² σ_n Kg/cm² Mohr envelopes of stress.
• Baserat på triaxialförsök på morän med $D_{\max}$ 38mm gav inre friktionsvinkel $\phi' = 35^\circ$. • Standard Proctor max torrdensitet 2,178g/cm³ och Optimal vattenkvot 7,7-8,8%.	<u>Dussault et al (1970):</u> Des échantillons triaxiaux de 6 po. (~15.2 cm) de diamètre ont été préparés à partir de la fraction du till passant le tamis de 1½ po. (~3.8 cm). Aucune correction n'a été faite pour tenir compte de la fraction enlevée. La densité sèche maximum obtenue suivant la procédure standard AASHO (Méthode C) était en moyenne de 136 lb/pi.³ (2.178 g/cm³) à des teneurs en eau optima variant de 7.7 à 8.8%. Les essais $\bar{Q}_1$, $\bar{R}_1$, et S_1 de la première série ont donné un angle de frottement interne ϕ' de l'ordre de 35° (Fig. 5); cette valeur reflète directement une densité très élevée.  POURCENTAGE PASSANT TILL - ÉCHANTILLONS DES ESSAIS TRIAXIAUX (ZONE I) RÉSISTANCE AU CISAILEMENT (τ) EN kg /cm² EFFORT EFFECTIF (σ') EN kg /cm² Fig. 5. Résultats des premiers essais $\bar{Q}$, $\bar{R}$ et S sur l'échantillon de granulométrie "A".
Triaxialförsök på morän visar: • Morän beter sig hållfasthetsmässigt som friktionsmaterial.	<u>ICOLD (1989):</u> Strength and deformability parameters and permeability values are generally measured from drained consolidated triaxial tests on samples up to 150 mm in diameter (50). Strengthwise, moraine behaves as a granular material. However, at low or medium confining pressures, some moraines may exhibit some cohesion which is often disregarded for the purpose of stability analysis. For a given stress level, the shear strength is related to the fines content. This is why sandy-silty moraines from Eastern Canada and Scandinavia (Sweden, Norway, Finland) containing less than 5 % clay-sized particles (finer than 0.02 mm) exhibit a rather large angle of shearing resistance ranging from 35 to 45° with little or no cohesion intercept. On the other hand, the angle of shearing

- Vid låga omlagringstryck kan vissa moräner uppvisa viss kohesion.

- Vid en given jordspänning så beror hållfastheten av finjorden.

Egenskaper hos typiska sandiga-siltiga moräner i Skandinavien:

- $<5\% < 0,002\text{mm}$.

- $\phi' = 35-45^\circ$ (utan kohesion).

Vattenkvot vid packning inverkar på skjuvhållfastheten:

- Mindre variation över/under optimal kan leda till minskning av skjuvhållfasthet på $3-5^\circ$.

The shear strength as with most soils is related to the stress level i.e., the higher the confining pressure, the smaller the angle of shearing resistance. Fig. 3.3, borrowed from Loisel and Hurtubise (50), illustrates a change from 48 to 37° with an effective minor principal stress varying from 100 to 600 kPa. For a confining pressure exceeding 600 kPa, the angle of shearing resistance remains nearly constant varying between 36 and 37° .

Water content during compaction has an effect on shear resistance. A small variation above or below optimum may result in a decrease in angle of shearing resistance varying between three and 5° . Fig. 3.4 taken from Lafleur *et al.* (47) shows that fact very clearly.

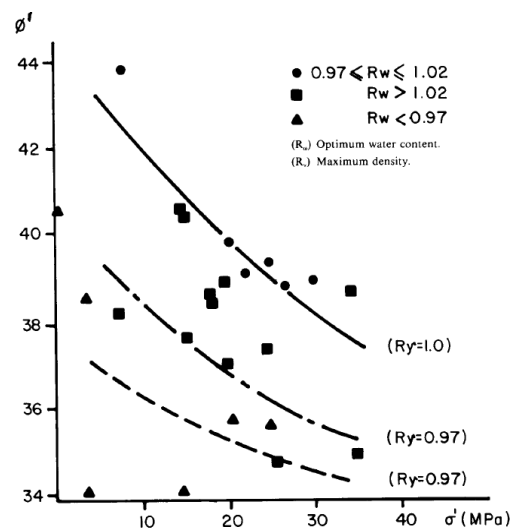
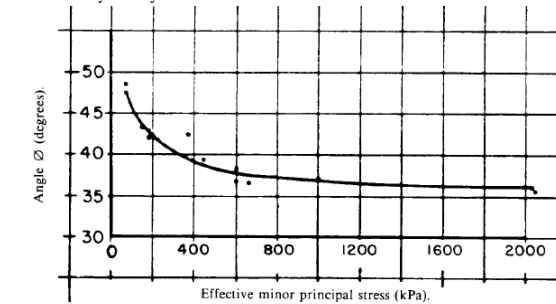


Fig. 3.4

Angle of shearing resistance ϕ' as a function of confining stress (σ'), compaction water content (w) and density (γ).

FYLLNINGSDAMMARS TÄTKÄRNA OCH FILTER

I en fyllningsdamm utgör tätkärnan den tätande zonen, det vill säga den hydrauliska barriären i en flödessystemet, som gör det möjligt att dämna upp vatten. Filtret till tätkärnan, det så kallade finfiltret eller det kritiska filtret, är avgörande för tätkärnans långtidsfunktion och skydd.

Här ges en samlad bild av tekniska krav och rekommendationer kring utformningen av tätkärna och filter, två helt avgörande komponenter i en fyllningsdamm.

Den gällande vägledningen RIDAS, 2012 rekommenderar vissa åtstramningar. Syftet är att säkerställa att specificerat material erhålls i fält och att detta uppvisar en fullgod funktion över tid.

Den här sammanställningen ökar förståelsen för utvecklingen av materialkraven över tid för de avgörande komponenterna i en damm och informationen kan användas vid design av tätjord och kritiska filter.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk