

Aanvullende Code van goede praktijk 3

Pompen van grondwater voor grondwaterverlaging

Leefmilieu Brussel

Inhoud

1. INLEIDING	3
2. BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEKEN EN TECHNOLOGISCHE PRINCIPES	5
2.1. OPEN PUT BEMALING / POMPPUT	5
2.2. ONTTREKKINGSFILTERS	6
2.3. DIEPE BOORPUTTEN	8
2.4. VARIANTEN EN COMBINATIES	10
2.4.1. <i>Electro-osmose</i>	10
2.4.2. <i>EDUCTOR</i> systeem	11
2.4.3. <i>Verticale drainage</i>	12
2.5. SELECTIE VAN DE METHODE	12
3. BEHEER VAN DE MOGELIJKE IMPACT	15
3.1. BESCHRIJVING VAN DE IMPACT	15
3.1.1. <i>Erosie</i>	15
3.1.2. <i>Differentiele zetting</i>	16
3.1.3. <i>Veranderingen van de effectieve spanning</i>	16
3.2. MAATREGELEN OM DE IMPACT TE BEPERKEN	17
3.2.1. <i>Erosie</i>	17
3.2.2. <i>Differentiële zetting</i>	17
3.2.3. <i>Wijziging van de effectieve spanning</i>	18
4. TE VERZAMELEN INFORMATIE VOOR HET DIMENSIONEREN	20
4.1. LITERATUURBRONNEN	20
4.2. GRONDONDERZOEK	20
4.2.1. <i>Proefboringen en sonderingen</i>	20
4.2.2. <i>Meting van hydrodynamische parameters</i>	21
4.2.3. <i>Meting van mechanische parameters</i>	22
4.2.4. <i>Géofysica</i>	23
4.2.5. <i>Bepaling van het initiële verhang (hydraulische gradiënt)</i>	23
4.3. ANALYSE VAN DE OMGEVING	24
4.3.1. <i>Waterwinning</i>	24
4.3.2. <i>Potentieel verontreinigde site</i>	24
4.3.3. <i>Infrastructuur</i>	24
4.4. AANBEVELINGEN	24
5. MODELLERING	26
5.1. <i>POMPDEBIET</i>	26
5.2. <i>AFSTAND TUSSEN POMPPUTTEN</i>	26
5.3. <i>VOORAFGAANDE RAMING VAN ZETTINGEN</i>	26
6. TOEZICHT EN CONTROLE	28
6.1. <i>PEILBUISMETINGEN</i>	28
6.2. <i>OPVOLGING VAN DE WATERKWALITEIT</i>	28
6.3. <i>TOPOGRAFISCHE OPMETING</i>	28
7. CHECKLIST VOOR AANNEMERS EN DESKUNDIGEN	29
8. BIBLIOGRAFIE	32
9. BIJLAGEN	33
9.1. <i>GEOLOGIE VAN BRUSSEL</i>	33
9.2. <i>ONTWERPVERSLAG</i>	34
9.3. <i>BESLISSINGSBOOM</i>	35



1. INLEIDING

Deze code van goede praktijk beschrijft een bijkomende techniek die niet apart kan toegepast worden maar die als aanvulling gebruikt wordt bij een techniek voor de behandeling van bodemverontreiniging. Deze hulptechniek beoogt de verlaging van de grondwaterspiegel (bemaling) om civiele werken en werken voor sanitaire voorzieningen te kunnen uitvoeren onder het grondwaterniveau.

Het onttrokken grondwater is afkomstig ofwel van buiten de verontreinigde zone (perifere onttrekking) ofwel van de verontreinigde pluim. In dit laatste geval kan het onttrokken grondwater verontreinigd zijn en moet het behandeld worden vóór de lozing ervan. Bovengrondse behandeling van onttrokken grondwater is beschreven in Bijlage 1 bij de Code van Goede Praktijk.

Deze code bespreekt de verschillende beschikbare technieken en biedt een beslissingsmodel aan voor de selectie van de meest geschikte techniek voor een bepaald project. De code bekijkt de mogelijke impact van de grondwateronttrekking en formuleert maatregelen om deze impact te beperken.

Praktisch gezien beschrijft de code alle elementen die nodig zijn om de bemaling te kunnen toepassen en geeft aan welke parameters nodig zijn voor het projectontwerp en de evaluatie van de impact.

Het hoofddoel van deze code is het aanreiken van een methodologische handleiding om de ontwerper te begeleiden in het bepalen van de te kennen parameters zodat de meest geschikte methode voor bemaling en de maatregelen op de impact van het project te beperken, kunnen bepaald worden.

Opmerking

De ordonnantie van 5 maart 2009 met betrekking tot het beheer en de sanering van verontreinigde bodems en diens uitvoeringsbesluiten geven in verschillende artikels aan dat de codes van goede praktijk dienen nageleefd te worden. Wat de codes van goede praktijk met betrekking tot de sanering en het risicobeheer betreft, kan de erkende bodemverontreinigingsdeskundige in bepaalde gevallen mits een degelijk gefundeerde argumentatie, zoals bvb. op basis van een voorstel van de bodemsaneringsaannemer, afwijken van de bepalingen van de codes van goede praktijk. In dat geval behoudt Leefmilieu Brussel zich op elk moment het recht voor om bijkomende informatie of om bijkomend terreinwerk te vragen op basis van de bepalingen van de codes van goede praktijk, indien het noodzakelijk en pertinent wordt geacht.

We willen verduidelijken dat de code van goede praktijk van toepassing is voor alle werken die een behandeling door sanering of door risicobeheer omvatten, voor werken uitgevoerd in het kader van de minieme behandeling, voor werken van beperkte duur, follow-upmaatregelen en noodmaatregelen.

Opmerking

De ordonnantie van 5 maart 2009 met betrekking tot het beheer en de sanering van verontreinigde bodems en diens uitvoeringsbesluiten geven in verschillende artikels aan dat de codes van goede praktijk dienen nageleefd te worden. Wat de codes van goede praktijk met betrekking tot de sanering en het risicobeheer betreft, kan de erkende bodemverontreinigingsdeskundige in bepaalde gevallen mits een degelijk gefundeerde argumentatie, zoals bvb. op basis van een voorstel van de bodemsaneringsaannemer, afwijken van de bepalingen van de codes van goede praktijk. In dat geval behoudt Leefmilieu Brussel zich op elk moment het recht voor om bijkomende informatie of om bijkomend terreinwerk te vragen op basis van de bepalingen van de codes van goede praktijk, indien het noodzakelijk en pertinent wordt geacht.



We willen verduidelijken dat de code van goede praktijk van toepassing is voor alle werken die een behandeling door sanering of door risicobeheer omvatten, voor werken uitgevoerd in het kader van de minieme behandeling, voor werken van beperkte duur, follow-upmaatregelen en noodmaatregelen.

2. BESCHRIJVING VAN DE TECHNIEKEN EN TECHNOLOGISCHE PRINCIPES

Bodembehandeling gaat soms gepaard met ontgravingen onder het niveau van de grondwatertafel. Om drijfzand of problemen met de stabiliteit van de verticale wanden van de ontgravingszone te vermijden, moet het grondwaterniveau verlaagd worden. Het verzekert de veiligheid van het uitvoerend personeel, gebouwen en naburige infrastructuur.

De verlaging van het stabiele grondwaterniveau kan uitgevoerd worden door één of meerdere installaties die aangepast zijn aan de eigenschappen en permeabiliteit van de bodem, aan de omvang van de zone, aan de diepte van de grondwaterlaag en aan de grondwaterkwaliteit.

Er zijn 3 hoofdmethoden voor de grondwater beheersing:

- **Open put bemaling** : waarbij grondwater via oppervlaktedrainage of gravitaire stroming wordt afgeleid naar een put om het via oppompen te verwijderen.
- **Bron bemaling (Strengembemaling)** : waarbij verschillende onttrekkingsfilters en/of ondergrondse drainagefilters gebruikt worden om de grondwaterspiegel te verlagen.
- **Indammen/waterkering** : waarbij fysische obstakels zoals damwanden geplaatst worden in de waterstroming. Deze techniek moet samen met de twee vorige technieken worden toegepast.

Deze code focust zich op het gebruik van volgende technieken

- Open put bemaling
- Bron bemaling
- Diepe boorputten
- Varianten en combinaties van bovenstaande technieken

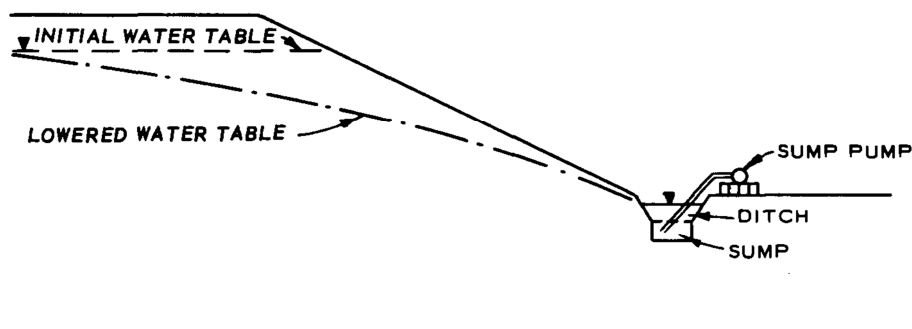
Deze traditionele technieken worden toegepast op watervoerende lagen met een goede permeabiliteit, voornamelijk zand en fijn grind. In **Bijlage 1** wordt een korte beschrijving gegeven van de geologie van in het Brussels-Hoofdstedelijk Gewest. Er is een duidelijke dominantie van tertiaire zandformaties die het gebruik van deze technieken mogelijk maakt.

In te grove ondergronden kan de grondwaterspiegel niet verlaagd worden omdat de onttrekkingsdebieten te groot moeten zijn ($k > 10^{-2} \text{ m/s}$) en de pompen hieraan niet kunnen voldoen. Het indammen van de onttrekkingszone voor instromend water kan een oplossing bieden. Deze techniek wordt besproken in Code van Goede Praktijk 10 ontgravingen.

In te fijne substraten kan niet efficiënt gedraineerd worden ($k < 10^{-6} \text{ m/s}$). Een combinatie van technieken is hier de beste aanpak (vacuümpompen, electro-osmose, verticale drainage).

2.1. OPEN PUT BEMALING / POMPPUT

De meest eenvoudige methode is het verzamelen van het grondwater in een greppel in de ontgravingsput om dit vervolgens op te pompen. De pompput wordt geplaatst op de bodem van de ontgraving (**Figuur 1**) die het onttrokken grondwater afleidt naar oppervlaktewater of een openbare riolering.



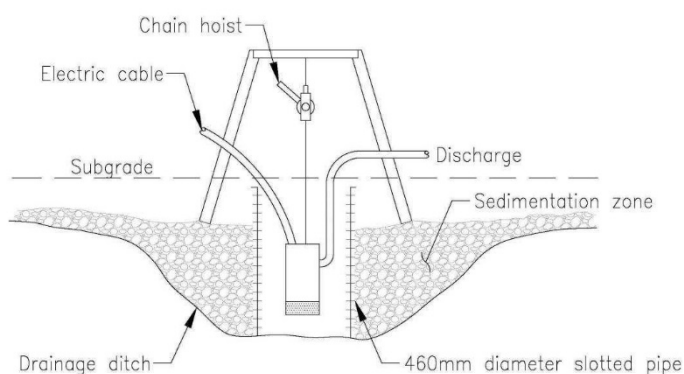
FIGUUR 1. SCHEMA VAN EEN POMPPUT (DEWATERING AND GROUNDWATER CONTROL (2004))

Het afleiden van het grondwater naar de pompput gebeurt gravitair maar kan vergemakkelijkt worden door drainagepijpen of open greppels in de ontgraving. Dit is de meest gebruikte en meest goedkope manier.

Een pompput zit 0,6 à 1 m diep. De wanden van de pompput worden beveiligd tegen instorting van de put door de plaatsing van houten stutlatten of een geperforeerde ijzeren of betonnen bak (**Figuur 2**).

De dimensies van de greppels en de drains moeten voldoende zijn voor een efficiënte bemaling en worden bepaald door de vergelijking met stromingen in open kanalen. Men mag niet vergeten dat het systeem moet ontworpen worden om naast het bemaalde grondwater ook regenwater te kunnen opvangen en verwijderen.

Het in suspensie brengen van sedimenten, dat grondverschuivingen kan veroorzaken, is het grootste nadeel aan deze techniek. Om dit te beperken, kunnen de greppels uitgerust worden met grind bedekt met geotextiel en voorzien worden van drainagepijpen.

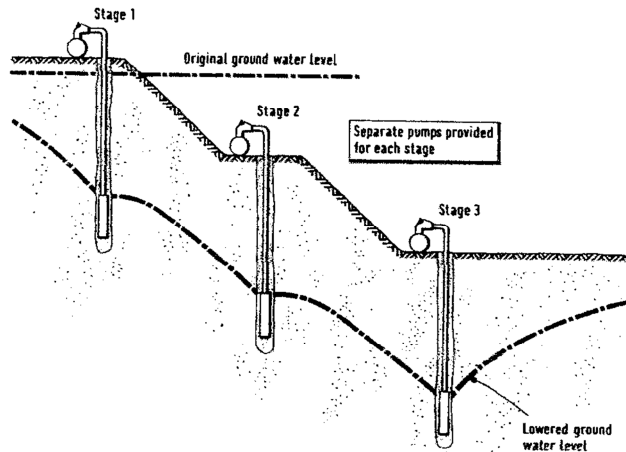


FIGUUR 2. SCHEMA VAN EEN POMPPUT (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

2.2. ONTTREKKINGSFILTERS

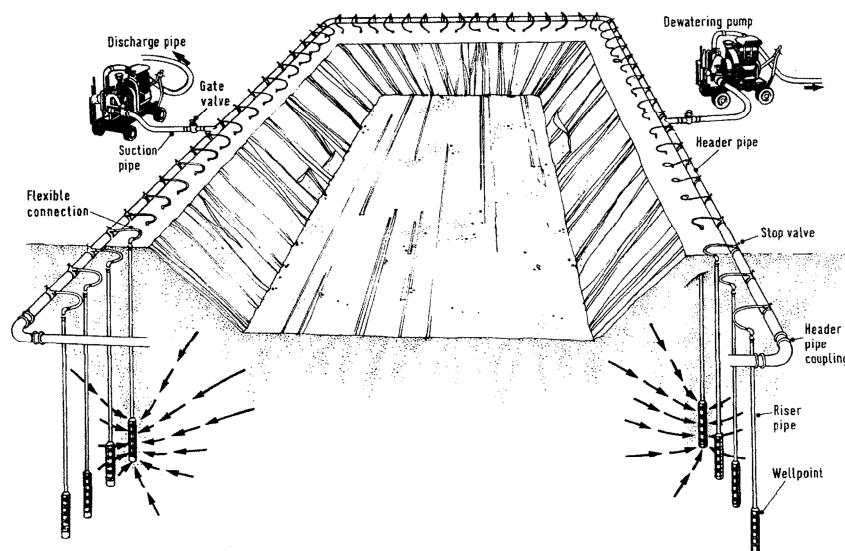
Onttrekkingsfilters worden het vaakst toegepast en zijn vaak de goedkoopste techniek (pre-uitgraving).

Deze techniek wordt gebruikt om de grondwaterspiegel 4,5 à 6 m ter verlagen ten opzichte van zijn stabiel niveau. Als de grondwaterspiegel met meer dan 6 m moet verlaagd worden, moeten verschillende niveaus van onttrekkingsfilters geplaatst worden (**Figuur 3**). De bemaling wordt gelimiteerd door de capaciteit van het pompsysteem dat zich aan de oppervlakte bevindt en cavitatieproblemen.



FIGUUR 3. GEBRUIK VAN ONTTREKKINGSFILTER OP VERSCHILLENDE NIVEAU'S (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

Deze techniek heeft als basisopstelling een pomp, collectorleidingen, verbindingen en de individuele filters (**Figuur 4**).



FIGUUR 4. ALGEMEEN ONTWERP (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

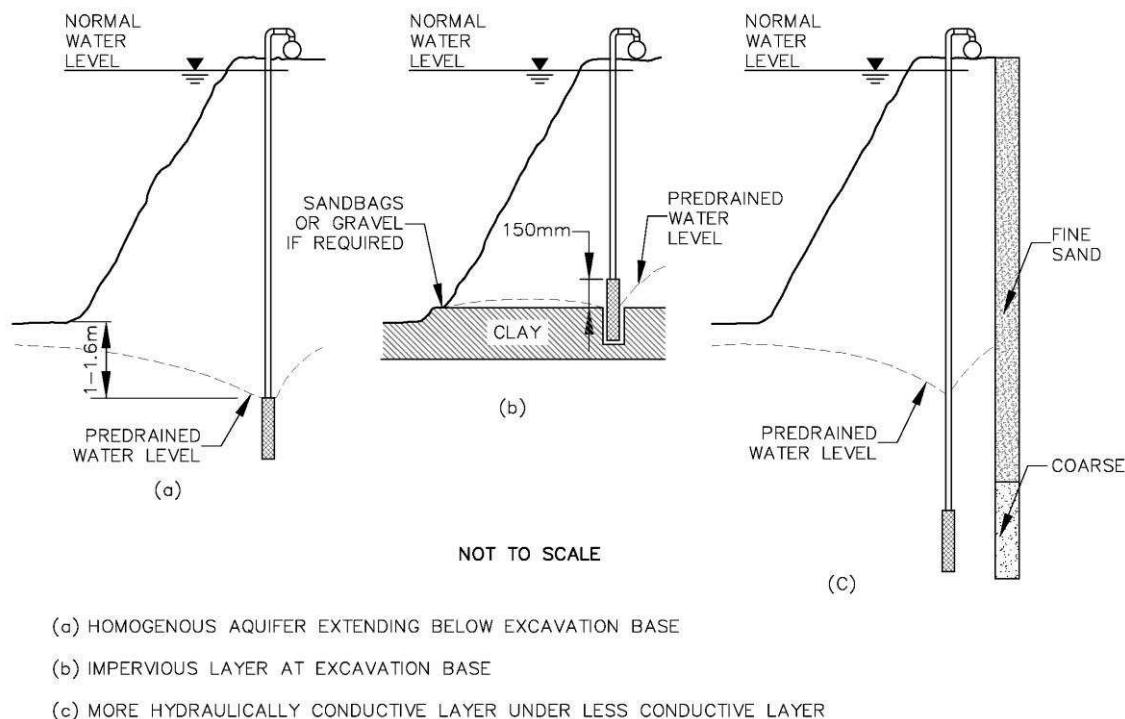
Meestal wordt een vacuümpomp gebruikt. Om een voldoende groot pompdebiet te verzekeren, worden er voor één pomp 70 tot 100 individuele filters aangesloten per 100 m collectorleiding.

Er moeten kleppen voorzien worden om bepaalde secties of filters te kunnen afsluiten. Standaardfilters hebben een diameter van 4-5 cm en zijn onderaan 1 m geperforeerd. Deze geperforeerde zone is meestal uitgerust met een zandfilter om migratie van fijne deeltjes doorheen het systeem te vermijden.

De onttrekkingsfilters worden geplaatst via boringen. De geperforeerde zone van de filter wordt net boven de gewenste diepte van de grondwaterspiegel geplaatst. Op het moment dat de onttrekkingsfilter lucht aanzuigt, is de gewenste diepte van de grondwaterspiegel bereikt.

De onderlinge afstand tussen de individuele onttrekkingsfilters hebben een significant effect op de efficiëntie van het systeem en moet afgestemd worden op de terreinkarakteristieken en verwachte stromingen. In de praktijk is de onderlinge afstand tussen de filters 1 tot 4 m.

Bij grote relatief homogene watervoerende lagen, wordt de onderlinge afstand bepaald op basis van de kwaliteit van het te onttrekken grondwater. Het totale pompvolume wordt verdeeld over het aantal filters waarbij drukverliezen op een aanvaardbaar niveau moeten gehouden worden.



FIGUUR 5. SCHEMA ONTTREKKINGSFILTERS (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

In plaats van onttrekkingsfilters, kan de expert voorstellen om een systeem van drainagebuizen te plaatsen. Hiervoor worden soepele PVC buizen gebruikt die geringd, geperforeerd en afgedekt zijn met kokosvezels of geotextiel. Deze buizen worden op maximum 8 m diepte geplaatst door een speciale machine (sleufmachine of graafmachine) en zijn uitgerust met hetzelfde type vacuümpomp als de onttrekkingsfilters.

Dit type installatie heeft een grote doorgang (vrije ruimte) nodig in de werkzone.

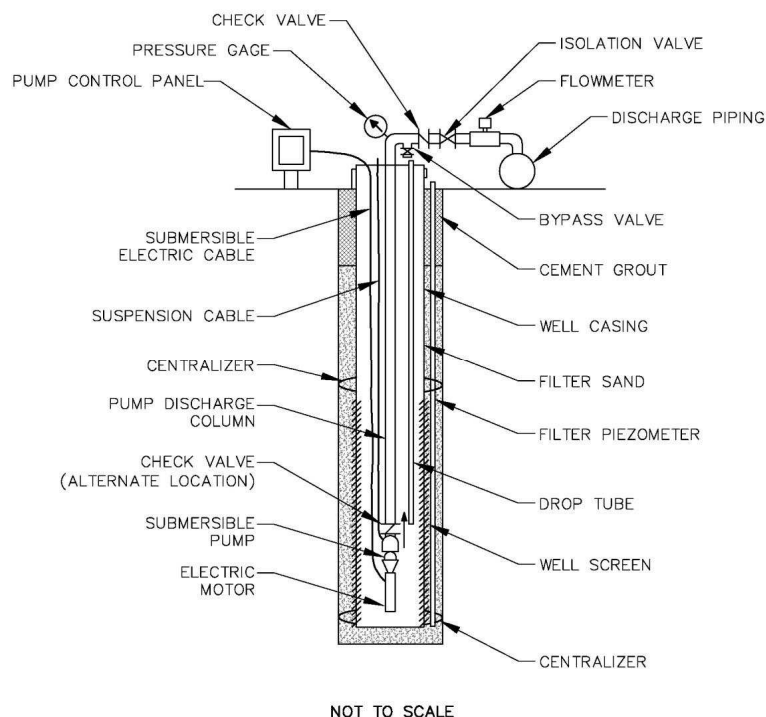
2.3. DIEPE BOORPUTTEN

Voor deze methode wordt een netwerk aan diepe putten geboord langs en in de buurt van de ontgravingszone.

Deze boorputten hebben een grotere diameter dan de normale onttrekkingsfilters (15 cm tot 1 meter). Elke boorput is uitgerust met een geperforeerde zone rond een filterend medium. De D50 (d.i. mediane korrelgrootte) van het filterend medium moet 4 tot 8 keer groter zijn dan de D50 van het materiaal van de watervoerende laag. Elke boorput is ook uitgerust met een ondergedompelde pomp. **Figuur 6** geeft het principe weer.

De onderlinge afstand van de boorputten is meestal groot en de boorputten worden op een diepte ver onder de ontgraving geplaatst. Deze techniek is het meest efficiënt voor grote homogene watervoerende lagen.

De kosten van deze techniek zijn afhankelijk van de boorwerken en de nodige machines en zijn dus in het algemeen hoog.



FIGUUR 6. SCHEMA BOORPUTTEN (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

De machines waarmee de putten worden geboord worden bepaald op basis van de karakteristieken van het terrein. Er kunnen vier verschillende soorten boringen onderscheiden worden (**Tabel 1**).

TABEL 1 INSTALLATIEMETHODES VOOR DE BOORPUTTEN (DEWATERING GUIDELINES, 2014)

WELL INSTALLATION METHOD	DESCRIPTION OF METHOD	TYPICAL WELL DIAMETER And MAXIMUM DEPTH
Jetting	Holepuncher on swinging or fixed leads is jetted into ground using high pressure water.	Diameters up 600 millimeters (mm), Depths up to 35 m
Bucket Auger Drilling	Bucket auger driven by Kelly bar, typically mounted on excavator or crane is used for excavation. Similar to drilled shaft excavation.	Typical diameters: 40 cm to 1 m, Depths up to 27 m

Rotary Drilling	Drill rig circulates fluid (drill mud or water) to move cuttings to surface. Typically drilled with roller or drag bits.	Diameters up to 450 mm typical, Depth dependent on capacity of drill rig, very deep depths possible.
Cased Drilling	Drilling method where casing is advanced with the drill head to maintain borehole stability. Bit is typically advanced by means of rotary percussion. Numerous applications and proprietary brand names.	Dual Rotary ("Barber"): diameters from 300 to 600 mm Duplex Percussive ("Odex", "Tubex", "Summetrix"): diameters up to 915 mm Down the hole percussive (best used in rock with casing above rock line): diameters up to 200 mm Sonic Drilling: diameters up to 305 mm Depth dependent on capabilities of drill rig, very deep depths possible.

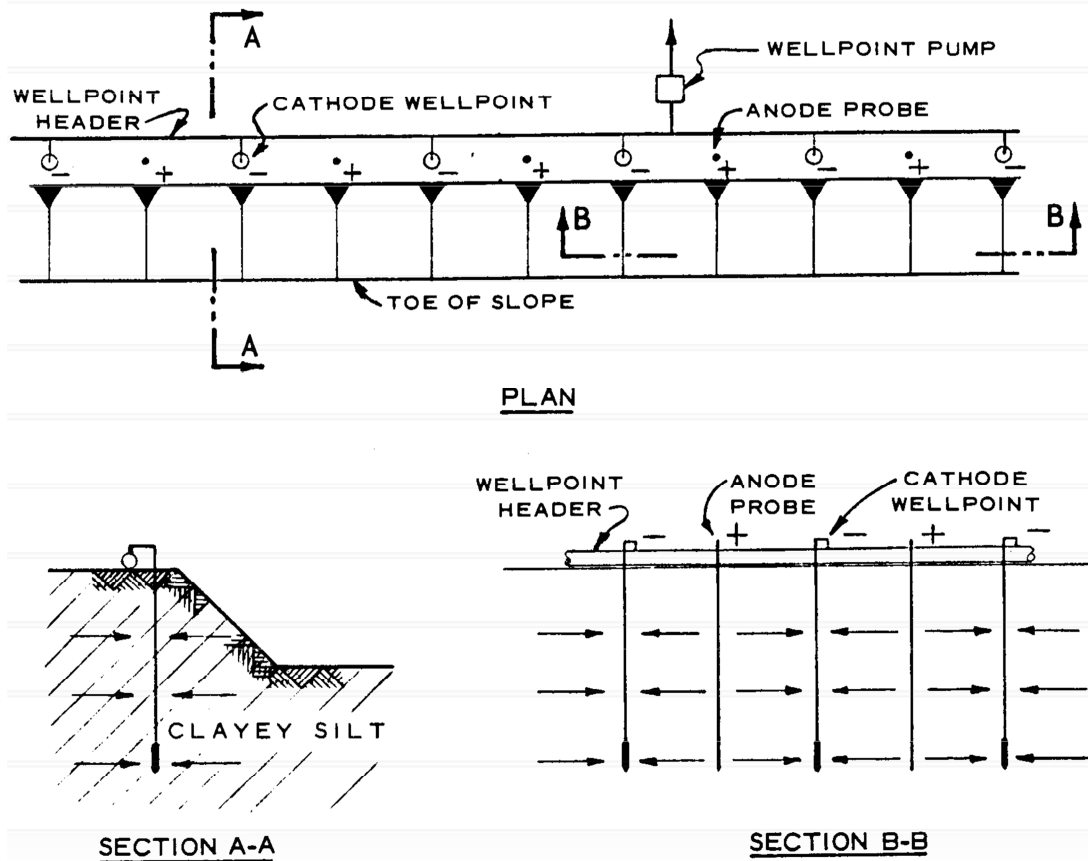
De putten kunnen uit verschillende materialen bestaan (PVC, HDPE, staal). Er zijn ook verschillende diameters mogelijk (3" tot 8") die, onder andere, afhankelijk zijn van mogelijke belasting van de pomp.

De poriëngrootte van de geperforeerde zone is van groot belang en varieert van 3 tot 45% laterale oppervlakte t.o.v. de totale oppervlakte van geperforeerde zone. De oppervlakte die de poriën innemen bepaalt de snelheid van het inkomende grondwater.

2.4. VARIANTEN EN COMBINATIES

2.4.1. ELECTRO-OSMOSE

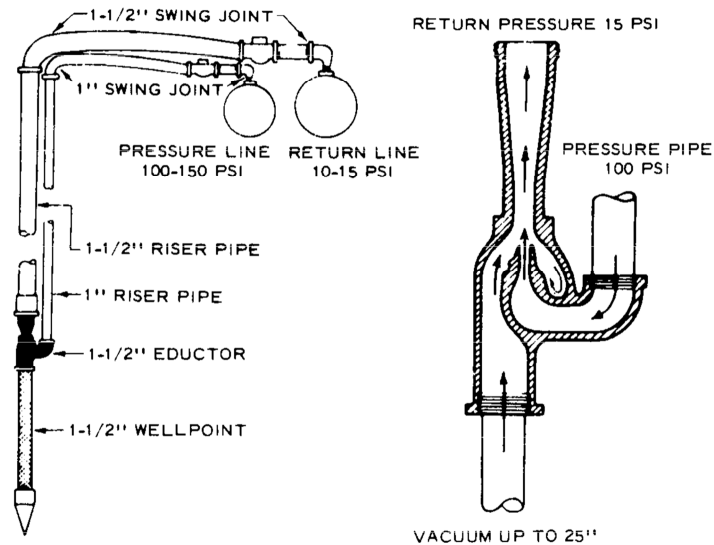
Sommige bodems met beperkte permeabiliteit, zoals bodems met leem, kleiachtige leem en leemachtige kleiachtige zand, kunnen niet efficiënt bemaald worden enkel met onttrekkingsfilters of putten. Het pompendement kan verbeterd worden door een elektriciteitsstroom door de bodem te sturen in de richting van de putten (**Figuur 7**). Het doel is om het grondwater te verwijderen uit de poriën en te mobiliseren van een positieve electrode (kathode) naar een negatieve electrode (anode) met behulp van een vacuümpomp.



FIGUUR 7. GEBRUIK VAN ELECTRO-OSMOSE VOOR DE VERBETERING VAN DE DRAINAGE VAN SLECHT DOORLATENDE BODEMS (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004).

2.4.2. EDUCTOR SYSTEEM

Dit systeem is vergelijkbaar met het systeem van de onttrekkingsfilter (met uitzondering van het pompmechanisme). In plaats van een vacuümpomp te gebruiken, wordt het grondwater onder hoge druk opgestuwd doorheen een venturikanaal aan het begin van de filter waardoor een daling van de druk en een opstijging van het water wordt gecreeërd (**Figuur 8**). Deze techniek wordt gebruikt bij diepe ontgravingen (10 tot 45 m) in slecht doorlatende watervoerende lagen.



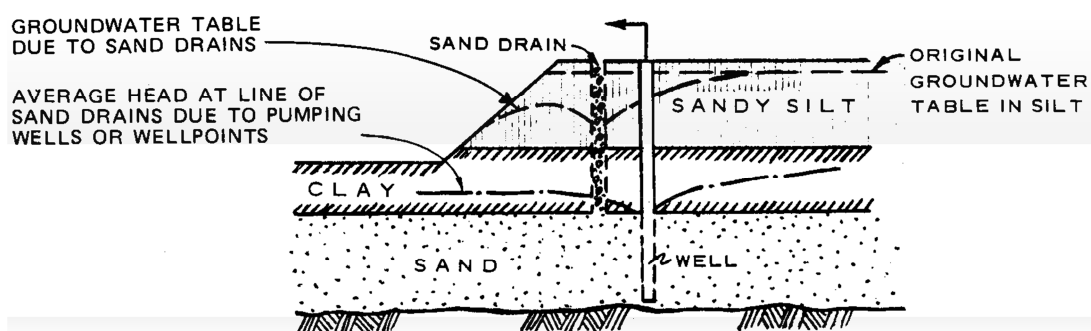
FIGUUR 8. JET-EDUCTOR SYSTEEM (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004)

2.4.3. VERTICALE DRAINAGE

In een gelaagde ondergrond waarbij watervoerende lagen met verschillende permeabiliteit elkaar afwisselen en bovenop op een goed doorlatende watervoerende laag die moet gedraineerd worden liggen, biedt deze techniek een goed alternatief. Het bestaat uit diepe boorputten en verticale drainerende sleuven.

Het waterpeil van de toplaag wordt verlaagd door middel van verticale zanddrains (**Figuur 9**). Insijpeling van grondwater in de toplaag wordt onderschept en het water wordt afgeleid naar de basis van de onttrekkingszone met boorputten.

De drain bestaat uit een permeabele zandkolom. De capaciteit van de drain kan verhoogd worden door de plaatsing van de drain (1" tot 2") in het filterend medium van de boorput.



FIGUUR 9. SCHEMA VERTICALE DRAINAGE US ARMY CORPS ENGEENIEERS, 2004

2.5. SELECTIE VAN DE METHODE

De selectie van de juiste methode moet gebaseerd worden op de technische en financiële haalbaarheid.

Tabel 2 geeft een samenvatting van de mogelijkheden van elke techniek.

TABEL 2 OVERZICHT VAN TECHNIEKEN US ARMY CORPS ENGENIEERS, 2004

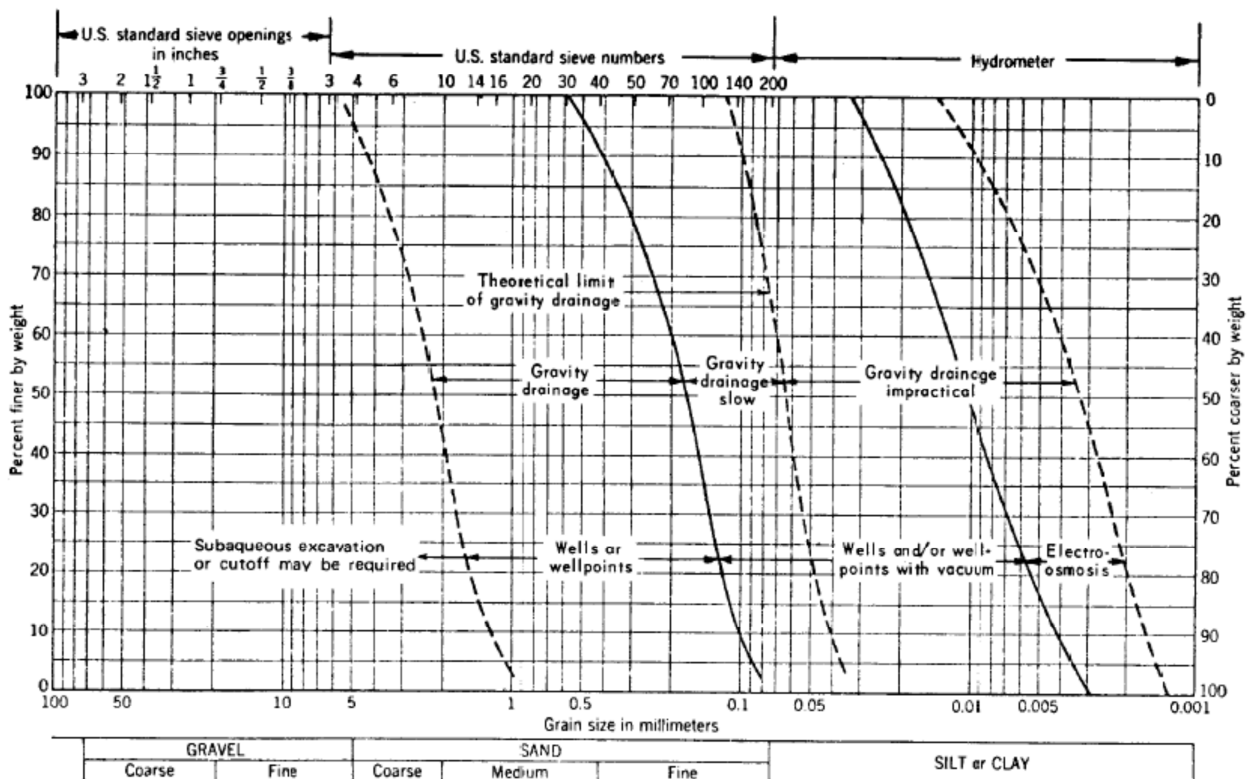
Me	Ap	Re
Sumps and ditches	Collect water entering an excavation or structure.	Generally water level can be lowered only a few feet. Used to collect water within cofferdams and excavations. Sumping is usually only successful in relatively stable gravel or well-graded sandy gravel, partially cemented materials, or porous rock formations.
Conventional wellpoint system	Dewater soils that can be drained by gravity flow.	Most commonly used dewatering method. Drawdown limited to about 15 ft per stage; however, several stages may be used. Can be installed quickly.
Vacuum wellpoint system	Dewater or stabilize soils with low permeability. (Some silts, sandy silts).	Vacuum increases the hydraulic gradient causing flow. Little vacuum effect can be obtained if lift is more than 15 ft.
Jet-eductor wellpoint	Dewater soils that can be drained by gravity flow. Usually for deep excavations where small flows are required.	Can lower water table as much as 100 ft from top of excavation. Jet-eductors are particularly suitable for dewatering shafts and tunnels. Two header pipes and two riser pipes, or a pipe within a pipe, are required.
Deep-well systems	Dewater soils that can be drained by gravity flow. Usually for large, deep excavations where large flows are required.	Can be installed around periphery of excavation, thus removing dewatering equipment from within the excavation. Deep wells are particularly suitable for dewatering shafts and tunnels.
Vertical sand drains	Usually used to conduct water from an upper stratum to a lower more pervious stratum.	Not effective in highly pervious soils.
Electroosmosis	Dewater soils that cannot be drained by gravity. (Some silts, clayey silts, clayey silty sands).	Direct electrical current increases hydraulic gradient causing flow.
Cutoffs	Stop or minimize seepage into an excavation when installed down to an impervious stratum.	See paragraph 2-8 for materials used.

Figuur 10 en Figuur 11 geven de selectiecriteria weer op basis van het bodemtype en het nodige vermogen van de onttrekking. Het toepassingsgebied is afhankelijk van de permeabiliteit van de watervoerende laag.



Soil type	Average particle size (mm)	Coefficient of permeability (m/sec)	Suitable dewatering depth						
			4 m	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m	28 m
Coarse gravel	60 ~ 20	> 1							
Medium gravel	20 ~ 6	> 1							
Fine gravel	6 ~ 2	$+10^{-1}$							
Coarse sand	2 ~ 0.5	$>10^{-2}$							
Medium sand	0.5 ~ 0.2	$>10^{-3}$							
Fine sand	0.2 ~ 0.05	$>10^{-4}$							
Coarse silt	0.05 ~ 0.02	$>10^{-5}$							
Medium silt	0.02 ~ 0.005	$>10^{-6}$							
Fine silt	0.005 ~ 0.002	$>10^{-7}$							
Clays	< 0.002	$<10^{-7}$							
Suggested dewatering method			Open sump method Well point method Electro-osmosis method Vacuum well point method Deep well method Deep wells + auxiliary vacuum pumps						

FIGUUR 10. TOEPASSINGSGBIED VAN DE VERSCHILLENDE BEMALINGSMETHODEN (DEWATERING GUIDELINES 2014)



FIGUUR 11. TOEPASSINGSGBIED VAN DE VERSCHILLENDE BEMALINGSMETHODEN (US ARMY CORPS ENGINEERS, 2004)



3. BEHEER VAN DE MOGELIJKE IMPACT

3.1. BESCHRIJVING VAN DE IMPACT

De grond is onderhevig aan spanning. De totale spanning σ is opgebouwd uit twee essentiële componenten:

- Grondwaterdruk (u): interstitieel water dat circuleert in de poriënruimte
- Effectieve spanning (σ'): gemiddelde contactkrachten tussen de korrels per totaal grondoppervlak

Dit wordt uitgedrukt door de Terzaghi formule:

$$\sigma = \sigma' + u$$

De ontwatering van de bodem om de grondwaterspiegel te verlagen, verlaagt de waterdruk en doet de spanning in de bodem stijgen.

Deze toont het globale effect, namelijk van de effectieve spanningen welke een vervorming van de korrelstructuur veroorzaakt en een alomtegenwoordige druk u , die geen vervormingen kan veroorzaken, ten minste niet rechtstreeks, echter wel onrechtstreeks daar veranderingen in de grondwaterdruk dikwijls een repercussie zullen hebben op de effectieve spanningen, waaruit vervormingen kunnen voortkomen.

De ontwatering met boven- of ondergrondse pompen kan dus leiden tot de verschuiving/mobilisatie van bodemdeeltjes: verhogingen of andere negatieve gevolgen zoals verzakking.

3.1.1. EROSIE

De hydraulische gradiënt is de drukval over een bepaalde lengte in de stromingsrichting. Als de hydraulische gradiënt groter is dan een kritisch waarde, is er gevaar voor sedimentenverschuiving in de watervoerende laag.

De verschuiving begint met de mobilisatie van de kleinste deeltjes en kan evolueren naar een volledige breuk van het 'granulair skelet'. Het belang van de erosie vertienvoudigt als het ontwerp van de bemaling niet optimaal is (poriëngrootte in de geperforeerde zone, filterend medium,...).

Erosie van de fijne fractie van de bodem kan leiden tot verzakkingen. De kans op verzakkingen kan bepaald worden met numerieke modellen die een inschatting maken van de hoeveelheid geërodeerd materiaal in de buurt van de pompputten (Cividini e.a., 2009).

Erosie is vooral van belang op sites waar holtes bestaan in de ondergrond, bijvoorbeeld door vorige activiteiten (oude funderingen, kanalen voor leidingen of nutsvoorzieningen,...). In het Brussels Hoofdstedelijk Gewest is dit vaak het geval.

De stijging in effectieve spanning op het granulaire skelet als gevolg van de bemaling kan leiden tot een drukstijging in de bodem aan of rond de holtes waardoor verzakking of doline vorming aan de oppervlakte kan optreden.

3.1.2. DIFFERENTIELE ZETTING

Een neveneffect van de bemaling tijdens het project is dat de onttrekkingskegel niet-uniforme wijzigingen veroorzaakt in de effectieve spanningen van de bodem. Het effect is des te groter naarmate men naar de kern van kegel gaat.

De infrastructuur in de nabijheid van de bemalingszone kan schade ondervinden als de juiste maatregelen niet worden genomen. Daarom moet er vóór de start van de werken een analyse van de mogelijke verzakkingen gebeuren.

Om significante verzakkingen te kunnen hebben, moeten volgende elementen aanwezig zijn :

- De samendrukbare laag moet relatief dik zijn
- De samendrukbaarheid van de laag moet hoog zijn: turf en zachte klei kunnen inzakken, zand zakt zelden in
- De bemaling moet meerdere dagen duren
- De bodem moet heterogeen zijn (differentiële zetting)
- De samendrukbare lagen mogen nog niet samengedrukt zijn (vroegere bemaling)

3.1.3. VERANDERINGEN VAN DE EFFECTIEVE SPANNING

Bij een opwaartse beweging van het water, daalt de verticale effectieve spanning in de bodem.

Wanneer de verticale gradiënt de kritische gradiënt nadert, is de effectieve spanning gedaald tot 0 en verliest de bodem zijn cohesie.

In de praktijk is de bodem onderhevig aan volgende krachten, per volume-eenheid:

- Schijnbaar gewicht γ' verticaal naar beneden gericht
- Grootte van de opwaartse stroming γ_w verticaal naar boven gericht

De kritische gradiënt i_c wordt gedefinieerd door $\gamma' = i_c \cdot \gamma_w$ waarbij de effectieve spanningen volledig verdwijnen, waardoor de korrels geen onderling contact meer hebben en de grond zich als een vloeistof gedraagt. Dit noemt men drijfzand. Als de gradiënt nog licht stijgt, komt de bodem omhoog. In zand en grind is de kritische gradiënt ongeveer 1.

3.1.3.1. Doorbreken waterlaag

De situatie waarin dit verschijnsel zicht het vaakst voordoet is wanneer men een ontgraving doet waaronder zich een afgesloten of half-afgesloten watervoerende laag bevindt. Hoewel de waarde van de waterspanning wordt gehandhaafd in de aquifer, neemt de dikte van deklaag af. Een ophoping van water ontstaat op het raakvlak en de hoeveelheid water zwelt nog aan doordat er bijkomend water aangevoerd wordt. Dit resulteert in een geleidelijke opheffing van het grondoppervlak tot dat de slecht doorlatende laag doorbroken wordt.

3.1.3.2. Het Renard verschijnsel

Het Renard verschijnsel is het afglijden van de bodem onder de damwanden wat leidt tot een bruuske en spectaculaire afkalving.

Immers, het gewicht van de grondlagen buiten de ontgravingsput heeft de neiging om de onderliggende bodem samen te drukken richting de ontgraving. Het verschil in de hydraulische belasting tussen de twee zijden (naast en in de put) zorgt ervoor dat het water de damwand langs onderen zal trachten te omzeilen.

3.2. MAATREGELEN OM DE IMPACT TE BEPERKEN

3.2.1. EROSIE

Een mogelijkheid om de effecten van erosie tegen te gaan is om de juiste bemalingssnelheid te kiezen zodat deze traag genoeg is. De intensiteit van de erosie op het terrein kan bepaald worden door het meten van de turbiditeit van het onttrokken grondwater. Voor een goede opvolging kan de expert een continue meting opleggen.

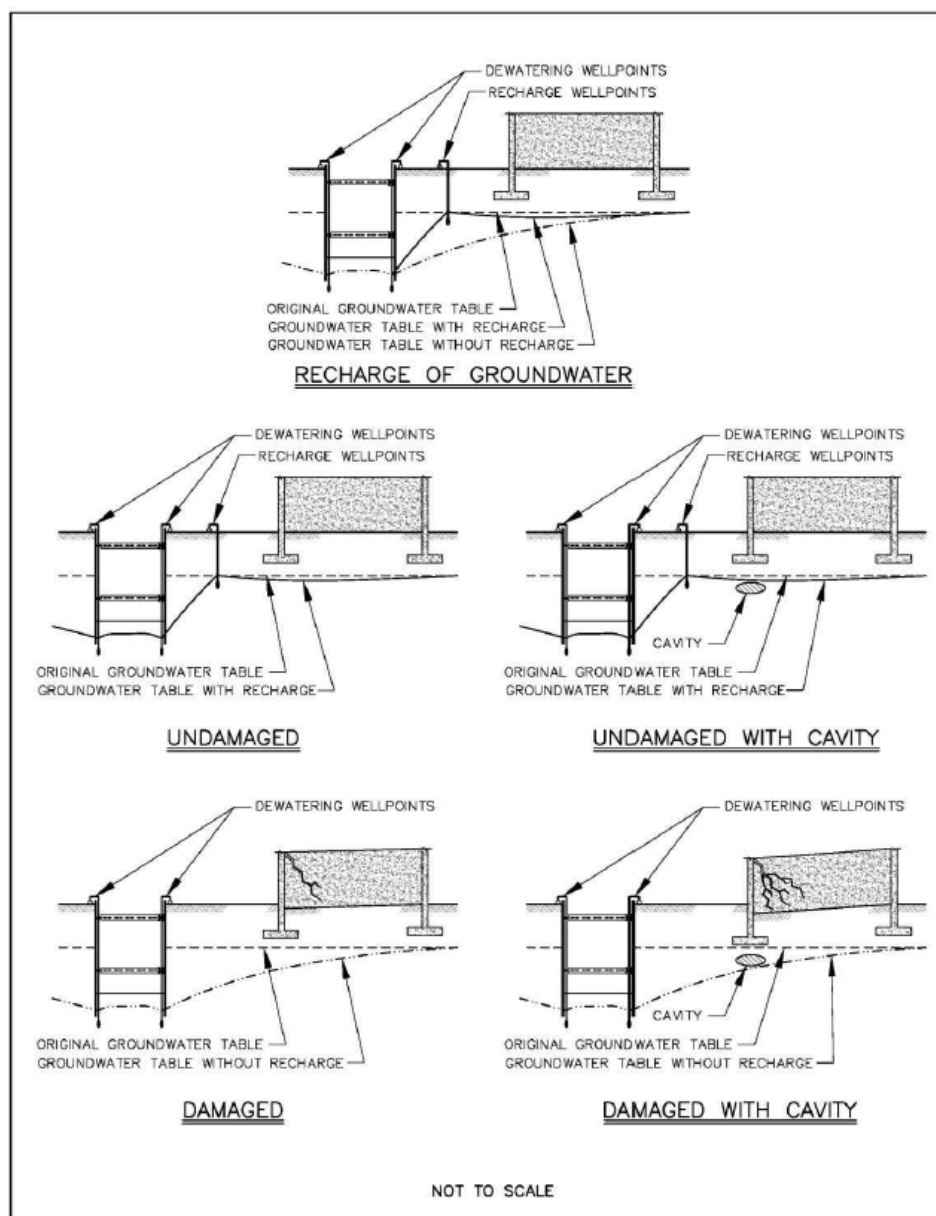
Bij > 50 NTU (nephelometric turbidity unit) is er een grote kans op bodemerosie en moet de bemalingssnelheid verlaagd worden. De meting van de opgeloste stoffen laat ook toe om het gewicht van de geërodeerde bodem per volume onttrokken grondwater in te schatten.

3.2.2. DIFFERENTIËLE ZETTING

Om de uitbreiding van de zone, beïnvloed door de bemaling, te beperken kan een deel van het onttrokken grondwater opnieuw geïnjecteerd worden (**Figuur 12**). Deze maatregel is het meest efficiënt als de putten voor de herinfiltratie of retourbemaling in de nabijheid van de zones die gevoelig zijn aan verzakking liggen.

Het debiet van de herinfiltratie is altijd lager dan het onttrekkingsdebiet om volgende redenen:

- De overdruk die kan toegepast worden op het te herinjecteren water hangt o.a. af van de beperkingen van de kleistop boven de filter
- Als de pompput in werking is, wordt een deel van de fijne deeltjes meegenomen door het water. Dit effect noemt men uitholling van de putten waardoor de permeabiliteit van de bodem verhoogt. Bij retourbemaling gebeurt het omgekeerde. De fijne fracties worden door het water ingebracht in de bodem waar ze de permeabiliteit verlagen
- Om economische redenen wordt het grondwater vaak geherinjecteerd via de bemalingsinstallatie zelf. Dit grondwater is vaak beladen met organisch materiaal en ijzerhoudende zouten. Het water wordt gemengd met lucht waardoor deze stoffen de ontwikkeling van een slecht doorlatende bacteriënfilm in de geperforeerde zone versnellen of ijzeroxides kunnen vormen. Het contact van het grondwater met de lucht moet vermeden (of beperkt) worden indien men het water wil herinfiltreren.



FIGUUR 12. RETOURBEMALING OM DE EFFECTEN VAN DIFFERENTIËLE ZETTINGEN EN INSTORTING TE VOORKOMEN (WATERING GUIDELINES, 2014)

3.2.3. WIJZIGING VAN DE EFFECTIEVE SPANNING

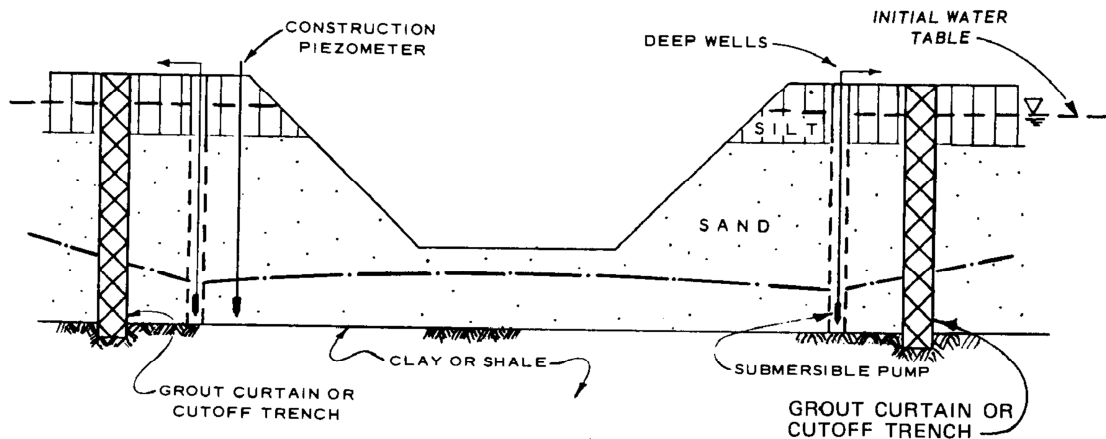
3.2.3.1. Doorbreken laag

De ingenieur zal regelmatig het niveau van de bodem van de ontgraving opmeten om zijn teams te waarschuwen indien er aanwijzingen zijn voor een eventuele doorbraak. In het geval er een ophoging optreedt, die in een eerste fase reversibel blijft indien de dikte en plasticiteit van de ondoorlaatbare laag dit toelaten, is het mogelijk om de veiligheid te verbeteren door het verlagen van de aquifer (plaatselijk verlagen van de hydraulische belasting). Deze belasting moet echter worden gemeten om geen overmatige verdichting uit te lokken. Als de ophoging niet in een vroeg stadium wordt ontdekt, kan de laag van putbodem doorbreken (het breken van de ondoorlatende deklaag met als gevolg het aanbrengen van materiële schade en/of het veroorzaken van gevaar voor de mensen die in de buurt zijn).

3.2.3.2. Bekisting

De installatie van beheersmaatregelen voor het grondwater kunnen noodzakelijk zijn in projecten waar het grondwater te hoog is om veilig en effectief te werken. De inperkingsmaatregelen fungeren als fysieke barrières om de laterale waterstroom ernstig te beperken (Figuur 13).

De afscherming wordt geleverd door middel van stalen wanden of damwanden, door (grout)muren uit beton of bentoniet (boren, geul en injectie).



FIGUUR 13. BEKISTING / DAMWANDEN (US ARMY CORPS ENGENIEERS, 2004)

Dit type ontwerp vereist bijzondere aandacht. Een slecht ontwerp kan leiden tot catastrofale situaties die moeilijk te herstellen zijn.

Voor damwanden die niet tot op het ondoordringbaar gesteente uitgevoerd worden, moet de stabiliteit van de ondergrond bestudeerd worden. Immers, het gewicht van de grond buiten de damwand heeft de neiging om de onderliggende bodem samen te drukken. Er ontstaat het Renard effect.

4. TE VERZAMELEN INFORMATIE VOOR HET DIMENSIONEREN

De expert kan de nodige informatie over het terrein uit de literatuurbronnen en uit grondonderzoek verzamelen. Afhankelijk van de grootte van het project, zal het één of de andere techniek de voorkeur hebben of nodig zijn.

4.1. LITERATUURBRONNEN

De geologische kaart van België op 1/40.000ste geeft een eerste beeld van de geologie van Brussel. De schaal van 1/40.000 en de achtergrond van de kaart maken het niet gemakkelijk de precieze locatie van terrein te vinden.

De ondergrond van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest werd gedurende decennia gedocumenteerd door een groot aantal geotechnische sonderingen voor de uitvoering van grote infrastructurele projecten. Al deze informatie werd samengesteld door de VUB in een reeks van "geotechnische kaarten" beschikbaar voor inzage.

De documenten zijn beschikbaar per sector en geologische informatie (formaties volgens curven van gelijke dikte, hydrogeologie, geomorfologie en verschijnselen en geodynamiek), antropogene kenmerken (grondwerken, vestingwerken, ondergrondse steengroeven, ...) en geotechnische kenmerken (fysische en mechanische eigenschappen van de verschillende formaties). Bij de kaarten hoort een verklarende tekst met een bespreking per geologisch substraat met eenvoudige statistieken verkregen van bepaalde fysieke en geomechanische parameters.

Het Vlaamse Gewest voorziet in een online databank met kaarten met onder andere ook het Brussels Hoofdstedelijk Gewest in opgenomen (<https://dov.vlaanderen.be/dovweb/html/index.html>). Alle nuttige en correcte informatie inzake geotechniek, geologie en hydrogeologie wordt in de databank opgenomen en geografisch gesitueerd, zoals sonderingen, boringen, grondwater-peilmetingen en kwaliteitsanalyses, pompputten, geologische kaarten, enz.

4.2. GRONDONDERZOEK

4.2.1. PROEFBORINGEN EN SONDERINGEN

De lithostratigrafie (grondlagenopbouw) moet nauwkeurig worden gedocumenteerd aan de hand van staalnames. De bemonsteringsdieptes zijn nauw verwant met de diepte van de uitgraving voorzien in het project. Het wordt aanbevolen om 1,5 tot 2,5 maal dieper te sonderen dan de uiteindelijke uitgravingsdiepte.

De proefboringen en/of sonderingen maken het mogelijk om de materialen macroscopisch te beschrijven, de aanwezigheid van een gevoelige laag (veen) te identificeren en bodemonsters voor fysische en/of chemische karakterisering te nemen.

De boorgaten kunnen worden voorzien van peilbuizen of putten met een relevante diameter voor het uitvoeren van de daaropvolgende hydraulische proeven.

Op basis van de proefboringen en/of sonderingen kan een eerste gedeeltelijk conceptueel model worden opgesteld.

4.2.2. METING VAN HYDRODYNAMISCHE PARAMETERS

4.2.2.1. Voorlopige beschrijving

Het conceptueel model ontwikkeld op basis van de beschrijvingen van de proefboringen en/of sonderingen wordt vervolledigd met een lokale hydrologische analyse. Het doel is om potentieel drainerende assen, zones van aanvoer en afvoer van het grondwater en de antropogene toevoer en afvoer van water te identificeren.

4.2.2.2. Meting van de statische grondwaterstand

Na het in evenwicht komen van het water in de peilbuis, wordt de statische grondwaterstand van de betreffende waterlaag/-lagen gemeten met een sonde. Deze meting geeft op een bepaald moment de toestand van het statisch evenwicht van het grondwater weer.

Voor meer informatie, moet de evolutie in de tijd van het niveau van het grondwater opgemeten worden met sondes (DIVER), zowel op korte als op middellange termijn. Deze informatie kan nuttig zijn voor het bepalen van de grootte van de aanvoer en afvoer van het grondwater.

4.2.2.3. Meting van de doorlatendheid

Het ontwerp van een bemalingsnetwerk wordt gemaakt op basis van de bepaling van de doorlatendheid van de watervoerende grondlaag.

In aanvulling op de gegevens uit de literatuur, moet de doorlatendheid op lokale schaal worden gemeten. Volgens de verwachte doorlatendheid van de watervoerende laag en het terrein zal een slug test, een putproef of een pompproef worden gepland.

De informatie verzameld tijdens een pompproef wordt gebruikt om de volgende hydrodynamische parameters te berekenen: doorlatendheid, invloedstraal, opslagcapaciteit en porositeit.

Zonder in te gaan op de details van de hydraulische berekening, zal de lezer in de onderstaande tabel een vermelding vinden van de belangrijkste wiskundige concepten die het pompdebiet met de grondwaterverlaging koppelen.

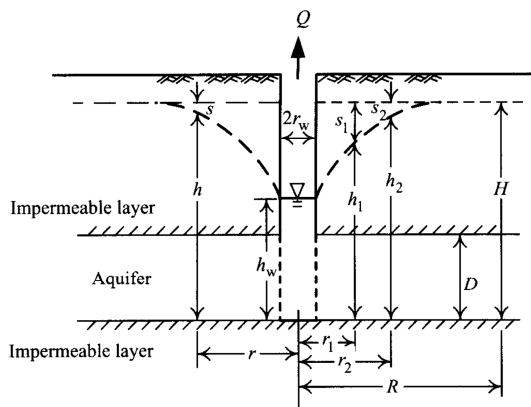
De onderstaande **Tabel 3** toont de berekeningsformule voor het debiet van afgesloten en vrije watervoerende lagen, voor volledige of gedeeltelijke infiltratieputten.

TABEL 3. BEREKENINGSFORMULES VOOR POMPDEBIET

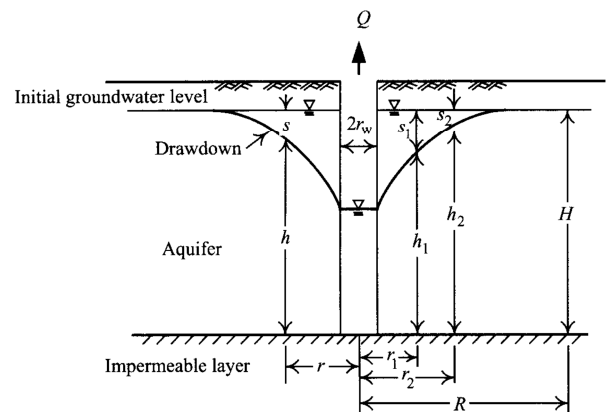
	Confined aquifer		Free aquifer	
	Full penetration well	Partial penetration well	Full penetration well	Partial penetration well
Nonequilibrium equation	Theis's equation: $s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ -0.5772 - \ln u - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n u^n}{n \times n!} \right\}$ Jacob's modified equation: $s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u)$ (Symbols are as shown in Figure 9.15)	—	If the drawdown induced by dewatering is far smaller than the thickness of the aquifer, Theis's and Jacob's equations can be used instead.	—
Equilibrium equation	Thiem's equation: $Q = \frac{2\pi kD(s_1 - s_2)}{\ln(r_2/r_1)}$ (Symbols are as shown in Figure 9.15)	Kozeny: $Q = \frac{2\pi T(H - h_w)}{\ln(R/r_w)} \mu$ $\mu = \frac{D_1}{D} \left(1 + 7\sqrt{\frac{r_w}{2D_1}} \cos \frac{\pi D_1}{2D} \right)$ (Symbols are as shown in Figure 9.19)	Dupuit-Thiem's equation: $Q = \frac{\pi k(h_2^2 - h_1^2)}{\ln(r_2/r_1)}$ (Symbols are as shown in Figure 9.20)	Hausman's suggestion: $Q = \frac{\pi k[H^2 - h_w^2]\alpha}{\ln(R/r_w)}$ $\alpha = \sqrt{\frac{H - D_1}{H}} \sqrt{\frac{H + D_1}{H}}$ (Symbols are as shown in Figure 9.21)

De basisopstelling worden geïllustreerd in **Figuur 14** en **Figuur 15**.

Afhankelijk van de aard van de te bekomen parameters, de soort grondwaterlaag en de constructie van putten, wordt de opzet van de pompproof bepaald door de ingenieur.



Afgesloten watervoerende laag, volledige infiltratieput



Vrije watervoerende laag, gedeeltelijke infiltratieput

FIGUUR 14 EN FIGUUR 15. BASISOPSTELLING VAN POMPPUT (HYDRAULIQUE DES SOLS, 1969)

4.2.3. METING VAN MECHANISCHE PARAMETERS

De volgende fysische kenmerken van de grond dient men minstens te bepalen: porositeit, verdichtingsindex en granulometrie (korrelgrootteverdeling).

Vanuit een lithologisch en mechanisch oogpunt, kan het terrein onder andere beschreven worden via CPT data (pomputten voor grondwater). In het geval van industriële sites, kan men in de interne archieven vaak het bestaan van dergelijke tests, eerder uitgevoerd tijdens de bouw van nieuwe installaties, ontdekken. De test geeft de puntweerstandswaarde en wrijvingsweerstand weer.

De oedometerproef (of samendrukkingsproef) wordt uitgevoerd om de samendrukbaarheidseigenschappen van grond te bepalen die toelaten de verdichting van de grondmassa in te schatten. De test wordt uitgevoerd in het laboratorium op ongeroerde bodemonsters met een diameter van 60-70 mm.

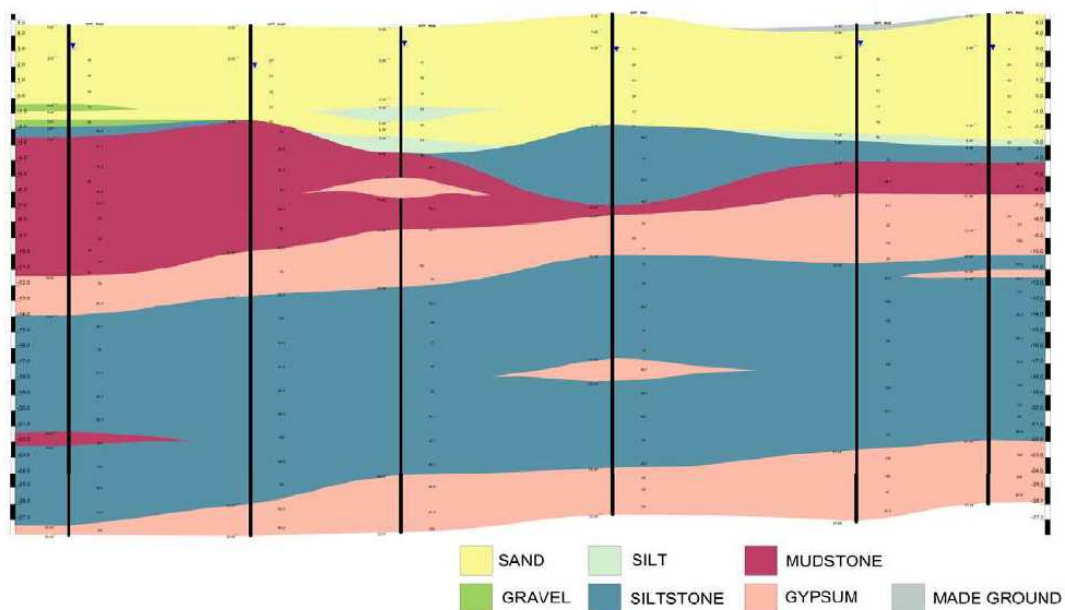
Anders kan de deskundige de compressie-index, C_c , indirect schatten via de volgende empirische relatie (Terzaghi en Peck, 1976) :

$C_c = 0,009 (W_L - 10)$, (W_L : vloeigrens) geldig in het geval van een normaal geconsolideerde klei ($W_L - 10$ uitgedrukt in %).

4.2.4. GEOFYSICA

Op de schaal van het terrein kan de structuur van de bodem op een efficiënte manier driedimensionaal in kaart gebracht worden met behulp van geofysische proeven. Elektrische sondering en seismische refractie kunnen ingezet worden aan een redelijke kost in vergelijking met de hoeveelheid verkregen gegevens.

Figuur 16 toont een geologische doorsnede opgebouwd uit de beschrijving van de boorresultaten en uit geofysische testen.



FIGUUR 16. LITHOLOGISCHE SNEDE OPGEBOUWD UIT BODEMONSTERSNAMES (WATERING GUIDELINES, 2014)

4.2.5. BEPALING VAN HET INITIËLE VERHANG (HYDRAULISCHE GRADIËNT)

Het bepalen van de gradiënt is geen essentieel element voor het opstellen van het ontwerp. Toch kan dit het conceptueel model versterken door bij te dragen aan een beter begrip van alle parameters van de ondergrond.

4.3. ANALYSE VAN DE OMGEVING

4.3.1. WATERWINNING

De invloedsstraal van een bemaling hangt af van de geometrie van de bemaling, het opgepompt debiet en doorlatendheid van de aquifer. In een doorlatende formatie is relatief gezien hoe groter de bemaling en hoe groter het pompdebiet, hoe groter het effect van de bemaling voelbaar is op waterwinningen gelegen binnen een kort bereik (50 tot 200 m).

De productiviteit van sommige waterwinningen in de buurt kan dus aanzienlijk worden gewijzigd. Het is daarom noodzakelijk om deze te bepalen en het gebruik ervan (hun invloed) nauwkeurig te beschrijven.

4.3.2. POTENTIEEL VERONTREINIGDE SITE

Zoals hierboven vermeld, kan het effect van een bemaling zijn dat grondwater verplaatst wordt met een grote invloedsstraal. De ontwerper moet dus aandacht hebben voor de aanwezigheid van andere verontreinigingen om te vermijden dat deze naar zich toe getrokken worden waardoor er dus andere verontreinigingspluimen verplaatst worden.

4.3.3. INFRASTRUCTUUR

De invloed van een groep van putten of een lijn van onttrekkingsfilters laat zich meestal voelen in een gebied dat ver voorbij de betrokken site reikt. In dit gebied wordt het water verwijderd uit de bodem als gevolg van de grondwaterverlaging en is de bodem niet langer onderworpen aan de druk van Archimedes. Dit resulteert in een toename van de effectieve spanning in de onderliggende bodemlagen.

Als deze samendrukbaar zijn, kan de toename resulteren in verzakkingen die de gebouwen gelegen in het beïnvloede gebied kunnen beschadigen. Men kan gemakkelijk aantonen dat een bemaling vooral nadelig is voor lichtgewicht constructies met een grote oppervlakte en met fundering op staal, dewelke vertrouwen op een voldoende draagkrachtige bodem. Daarom kan de uitvoering van een bemaling in stedelijke gebieden ernstige schade veroorzaken en moet een voorstudie gebeuren. Het is noodzakelijk om het volgende te bepalen:

- Kenmerken van de watervoerende laag: grondwaterstand, doorlatendheid, grondwaterstroming;
- De samendrukbaarheidseigenschappen van de verschillende lagen;
- Kenmerken van de funderingen van de gebouwen: het type en het niveau van de fundering, schaal van de werken (het aantal verdiepingen), afstand tot de groep van putten of lijn van onttrekkingsfilters.

4.4. AANBEVELINGEN

Afhankelijk van de mate van geologische risico's, de nabijheid van infrastructuur, de diepte van de ontgraving en de methode van waterkering, kunnen de aanbevelingen geformuleerd worden ten aanzien van de benodigde gegevens en hun kwaliteit:

- waterbalans (handmatige resolutie of numeriek model);
- analyse van de daling van de grondwatertafel (handmatige resolutie of numeriek model);
- aantal proefboringen (boringen tot 1,5 en 2 maal de diepte van de ontgraving);
- laboratorium test (korrelverdeling, oedometerproef);
- meting van de doorlatendheid (slug test of putproef).



Bijlage 3 stelt een reeks voor van aanbevelingen toegepast door de stad Abu Dhabi en aangepast door SITEREM. Hoewel het Brussels Gewest niet in kaart wordt gebracht als gevoelig gebied, lijkt het aangewezen, door de geologie, ervan uit te gaan dat het Brussels gewest gelegen is in gevoelig tot zeer gevoelig gebied.

5. MODELLERING

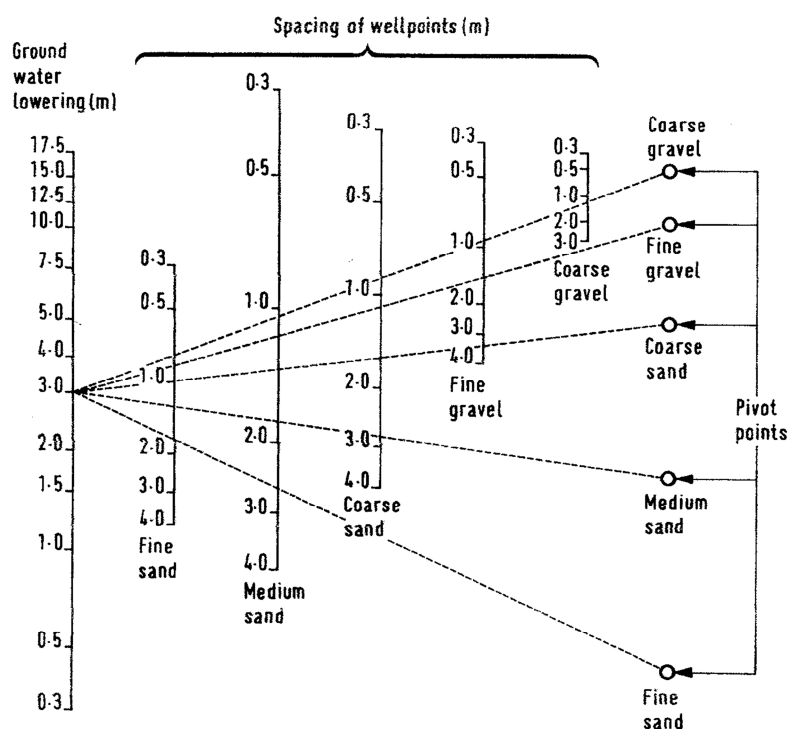
5.1. POMPDEBIET

Het bemalingsdebiet wordt berekend via de gewenste verlagingen (gegeven van het project), de metingen van de doorlatendheid (veldmeting), de omvang van de ontgraving ($\frac{\sqrt{ab}}{\pi}$ waar *ab* respectievelijk de lengte en de breedte van de ontgraving zijn) en de invloedstraal (berekend met Sichart) Kyrieleis, W., Sichardt, W. – Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten, Springer, Berlin, 1930

Het debiet per onttrekkingspunt wordt bepaald door de verhouding tussen het totale debiet en het aantal onttrekkingspunten.

5.2. AFSTAND TUSSEN POMPPUTTEN

De volgende nomogram is een hulpmiddel voor het bepalen van de afstand tussen de pompputten in zand en grind.



FIGUUR 17 NOMOGRAM (DEEP EXCAVATION, 2006)

5.3. VOORAFGAANDE RAMING VAN ZETTINGEN

De berekening van de zettingen wordt verkregen uit de vergelijking van Terzaghi (niet over geconsolideerde bodem):



$$\Delta S = Cc \times (hd - hwl) \times \log \left(\frac{\sigma'_{fxm}}{\sigma'_{0xm}} \right) / (1 + e)$$

Waar Cc : samendrukkingsmodulus
hd : waterdiepte na grondwaterverlaging
hwl : statisch niveau van de grondwatertafel voor grondwaterverlaging
 σ'_{fxm} : effectieve spanning na grondwaterverlaging op x m diepte
 σ'_{0xm} : initiële effectieve spanning op x m diepte
e : poriëngetal

De inschatting van de verdeling vereist de volgende gegevens:

- het gewicht van verzadigde grond (γ_s KN/m³),
- het gewicht van droge grond (γ_d KN/m³),
- porositeit (e),
- samendrukkingsmodulus (Cc),
- de grondwaterverlaging,
- de omvang van de aquifer.

Uit de vergelijking van de oppervlakte van de grondwaterverlaging is het mogelijk om de lijnen van verdichtingsgraad aan de rand van de bemaling uit te zetten. De opeenstapeling van deze lijnen op een plattegrond stelt ons in staat om de risico's voor de omgeving te begrijpen en maatregelen om hun impact te verminderen te identificeren.

6. TOEZICHT EN CONTROLE

Afhankelijk van de mate van geologisch risico, nabijheid van infrastructuur, de diepte van de uitgraving en de afscherpende maatregelen, kunnen aanbevelingen worden geformuleerd betreffende de op te volgen parameters tijdens de bemaling:

- opvolging van de grondwaterstand (installatie van 4 peilbuizen rondom);
- meting van de troebelheid, zoutgehalte en elektrische geleidbaarheid van het onttrokken water;
- meting van vervorming onderaan de bemaling.

6.1. PEILBUISMETINGEN

De peilbuismetingen moeten tegelijk met het pompen beginnen. De frequentie van monitoring is dagelijks en wordt automatisch met druksensoren opgevolgd (continue meting en registratie). Het doel is om de snelheid van de grondwaterverlaging en het verloop van de curve van grondwaterverlaging in functie van de tijd te beheersen tot evenwicht.

6.2. OPVOLGING VAN DE WATERKWALITEIT

De kwaliteit van het onttrokken water moet opgevolgd worden vanaf er met pompen begonnen wordt. De controlefrequentie is dagelijks of automatisch met behulp van een multiparameter-probe met gegevensopslag. Het doel is de intensiteit van erosie en de uitloging van zouten uit de bodem te meten.

Meer dan 50 NTU of 50 mg/l TSS moet de aannemer voor onaanvaardbaar erosie waarschuwen. Maatregelen moeten dan worden genomen, bijvoorbeeld door het verlagen van de snelheid van grondwaterverlaging.

6.3. TOPOGRAFISCHE OPMETING

Wanneer de maximale grondwaterverlaging is bereikt, kan het nodig zijn om regelmatig de evolutie van de diepte van de bodem van de ontgraving te controleren. Hierbij is geautomatiseerde apparatuur aan te bevelen (tachymeter of GPS).

Elke neiging tot verheffing zal direct worden aangepakt door passende maatregelen (pompen, belasting in de ontgraving, ...).

7. CHECKLIST VOOR AANNEMERS EN DESKUNDIGEN

De 'checklist' voor aannemers en deskundigen worden voorgesteld in **Tabel 4** en **Tabel 5**. Deze lijst is bedoeld om de betrokkenen te helpen bij het opstellen van de werkomschrijvingen, kostenramingen en het uitwerken van de lastenboeken voor de aannemers.

TABEL 4 CHECKLIST VOOR AANNEMERS

Rubriek	Controle
Voorafgaande informatie compleet en voldoende (bestek, omschrijving der werken)	
Gevoelige doelgroepen	Gevoelige doelgroepen aanwezig op en in de omgeving van de werf correct geïdentificeerd
Technische specificaties van het lastenboek of werkbeschrijving	Beschrijving van de verzamelinrichting, de voorbehandeling, en nabehandeling (omvang, kenmerken, locatie ...) Definitie van de fysische grootheden: debieten, druk, drukval, pomptypes.
Vaststelling van de benodigde toelatingen en van het normatieve kader dat gerespecteerd moet worden	Controle of de noodzakelijke toelatingen aangevraagd werden door de opdrachtgever. Controle of de uitgevoerde inspanningen coherent zijn met het normatieve kader.
Vaststelling van specifieke procedures die gerespecteerd moeten worden	Vaststelling van specifieke procedures en controle of er in het bestek of in de werkomschrijving mee rekening is gehouden: gasemissies, lozing van water, ...
Lozingspunten	Lozingspunten van water en behandelde gassen uit voornoemde behandeling bepaald en compatibel met de kenmerken van de site. Vergunningen gevraagd en verkregen
De communicatielijnen zijn gedefinieerd	Identiteit en de contactgegevens van de toezichthouder, de opdrachtgever, de agent van Leefmilieu Brussel, de bevoegde autoriteiten zijn bekend.
Informatie die beschikbaar moet zijn in het veiligheids- en gezondheidsplan van de aannemer	
Vaststelling en aard van de risico's	Risico op explosie in het leidingnetwerk te wijten aan de aanwezigheid van vluchtige verbindingen
	Risico op instorten of doorbraak
	Risico voor het personeel vanwege het risico van lekken en morsen
	Risico op ongevallen in het algemeen: vallen, brandwonden, elektrische schokken
	Risico's verbonden aan de inbraak op de site van onbevoegden: diefstal, vandalisme en risico voor de gezondheid
	Klimatologische risico's: het bevriezen van installaties
	Risico's die verband houden met het verkeer indien infrastructuur aanwezig is op de openbare weg
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, vaststelling en uitvoering van preventieve maatregelen (explosieveilige elektrische apparatuur, persoonlijke beschermingsmiddelen), inbegrepen opleiding van het personeel
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (in spoed indien nodig)
Te contacteren personen en diensten in geval van een probleem	Voor elk van de vastgestelde risico's, identiteit en coördinaten van te contacteren personen en diensten: brandweer, gemeente, civiele bescherming, nutsbedrijf,...
Vaststelling van mogelijke hinder	Geur en gevaarlijke dampen voor de buurt in geval van lekkages en verliezen uit de installaties
	Lawaai van de machines : pompen, generatoren,
	Opstopping van de toegangswegen
	Stabiliteit van de omliggende gebouwen
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, vaststelling en omschrijving van de preventieve maatregelen. Bijvoorbeeld, het inzetten van explosiemeters, alarmsystemen en stopprocedure en back-up (toedienen van lucht in de leidingen), opmeting van zettingen
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (in spoed indien nodig)
Planning van de interventies	
Monitoringsplan en onderhoud	Planning van controlebezoeken : minstens tweemaandelijks
	Planning van onderhoudsbezoeken
Vaststelling van defecten en technische problemen die zich kunnen voordoen	Defecten aan de uitrusting en aan de installatie: lekken
	Risico op verstopping van leidingen en filters: daling van debieten, druk en onderdruk
	Voortijdige uitputting van de materialen die worden gebruikt voor de verwerking van gas en water (actief kool)
Plaatsen van alarmsystemen, backup en stopprocedure	
Correctieve maatregelen en interventie maatregelen	Voor elk van de mogelijke problemen: voorbereiding van correctieve maatregelen en interventie maatregelen (in spoed

	indien nodig)
Toezichtrapportage van de expert	Rekening houdend met de opvolgingsrapporten van de expert, uitvoering van correctieve en optimalisatie maatregelen

TABEL 5 CHECKLIST VOOR DE DESKUNDIGE

Rubriek	Controle
Voorafgaande informatie compleet en voldoende (voorafgaande studie, bestek, omschrijving der werken	
Aanwezige verontreinigingen en/of te behandelen in het grondwater	Aard van de te behandelen verontreinigingen, concentraties en de mogelijke variaties in concentraties, de aanwezigheid van een drijfslag, verwachte veranderingen in de concentraties (gemeten evolutie, potentieel aan natuurlijke afbraak)
Gevoelige doelgroepen	Gevoelige doelgroepen aanwezig op en in de omgeving van de werf correct geïdentificeerd
Technische aspecten van de installatie	Beschrijving van de behandeling (omvang, kenmerken, locatie ...) Definitie van de fysische grootheden: debieten, druk, drukval, temperatuur. Instellingen van de bedrijfsmodus: bemalingsmethode. Zijn de technische vereisten aangepast aan de karakteristieken en debiet van het te behandelen water.
	Werksmodus van de installatie: continue versus intermitterend. Verstopping risico's. Correctieve maatregelen en mogelijke optimalisatie.
	Voorafgaandelijke controle van de prestaties van de installatie: op basis van beschikbare gegevens, laboratoriumtesten.
Lozingspunten	Lozingspunten van water en behandelde gassen uit voornoemde behandeling bepaald en compatibel met de kenmerken van de site. Vergunningen gevraagd en verkregen
Vaststelling van de benodigde toelatingen en van het normatieve kader dat gerespecteerd moet worden	Controle of de noodzakelijke toelatingen aangevraagd werden door de opdrachtgever. Controle of de uitgevoerde inspanningen coherent zijn met het normatieve kader. De voorziene procedures zijn deze conform met de codes van goede praktijk en andere aanbevelingen van Leefmilieu Brussel
Vaststelling van specifieke procedures die gerespecteerd moeten worden	Vaststelling van specifieke procedures en controle of er in het bestek of in de werkomschrijving mee rekening is gehouden: transport van gevaarlijke afvalstoffen (condensaten), gasemissies, ...
De communicatielijnen zijn gedefinieerd	Identiteit en coördinaten van de toezichthouder, de opdrachtgever, de inspecteur van Leefmilieu Brussel, het bevoegd gezag zijn gekend
Vaststelling en aard van de risico's	Risico op explosie in het leidingnetwerk te wijten aan de aanwezigheid van vluchtige verbindingen
	Risico op verontreiniging van de bodem en het grondwater als gevolg van de opslag van gevaarlijke producten en/of verontreinigende stoffen
	Klimatologische risico's: het bevriezen van leidingwerk en installaties
	Risico's die verband houden met het verkeer indien infrastructuur aanwezig is op de openbare weg
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde risico's, identificatie en installatie van preventieve maatregelen inbegrepen de opleiding van het personeel
Te contacteren personen en diensten in geval van een probleem	Voor elk van de vastgestelde risico's, identiteit en coördinaten van te contacteren personen en diensten: brandweer, gemeente, civiele bescherming, nutsbedrijf,...
Vaststelling van mogelijke hinder	Geur en gevaarlijke dampen voor de buurt in geval van lekkages en verliezen uit de installaties
	Lawaai van de machines : pompen, generatoren,
	Opstopping van de toegangswegen
	Stabiliteit van de omliggende gebouwen
Preventieve maatregelen	Voor elk van de vastgestelde hindergevallen, vaststelling en omschrijving van de preventieve maatregelen
	Inzetten van explosiemeters, alarmsystemen en stopprocedure en back-up (toedienen van lucht in de leidingen)
Planning en inhoud van het toezicht en de validatie	
Controleapparatuur	Beschrijving van de controle-apparatuur: debietmeters, manometers in installaties, identificatie van controlepunten van de grondwaterverlaging
Op te volgen parameters	Debietmetingen van te behandelen water, concentraties in het te behandelen water (variaties en evolutie), de aanwezigheid van een drijfslag, turbiditeit. Meting van zettingen. Concentraties in effluent en gasemissies.
Te optimaliseren parameters	Aanpassing van pompdebiet aan de evolutie van de grondwaterverlaging
Rapportage	Zijn de verzamelde gegevens voldoende voor de opstelling van deze rapporten?



8. BIBLIOGRAFIE

- Geotechnical, geophysical and hydrogeological investigation project. Dewatering guidelines. Juillet 2014.
- Dewatering and groundwater control, 2004. US Army Corps Engineers
- Chang-Yu OU. Deep excavation, 2006.
- Procédé d'exécution et techniques de chantier. ECAM 2^{ème} Licence
- J. Patrick Powers, Arthur B. Corwin, Paul C. Schmall, Walter E. Kaeck. Construction Dewatering and Groundwater Control: New Methods and Applications, 3rd Edition. May 2007

9. BIJLAGEN

9.1. GEOLOGIE VAN BRUSSEL

Samenvatting van de geologie in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest (Introduction générale à la géologie de Bruxelles, Christian SCHROEDER & Pierre GERARD, ULB, Journée d'étude SBGIMR – 22/02/2013) : subhorizontale lagen (een paar graden naar het noordoosten duikend) met deklaag van Quartaire lemige of alluviale afzettingen.

Van boven naar onder (met chronostratigrafische namen) :

- Ophogingsmateriaal, bijna overal aanwezig, met variabele diktes (0 tot 12-14 m) ;
- Kwartaire afzettingen :
 - o Alluviums van vallei van de Zenne kleiig-zandig, lokaal veenhoudend ;
 - o Afzettingen van Hesbayaan en Campiniaan (q3 et q2) $\approx$ 10 m dikte in de alluviale vlakte van de Zenne (5 m op de hellingen) ;
- Formaties van het boven Eoceen (Tertiair) :
 - o Asse en Wemmel (As et We) (Maldegem), zanden 0 tot 6 m dikte ;
 - o Lede (Le), zanden, soms verhard tot zandsteen 0 tot 18 m dikte ;
- Formaties van het midden Eoceen (Tertiair) :
 - o Laken (Lk) (Lede), zanden en kalkrijke zandsteen ;
 - o Brussel(B) (Lutetiaan), zanden, soms verhard tot zandsteen 0 tot 44 m dikte, goede geotechnische eigenschappen, lokale aanwezigheid van concreties (verspreid in bijna continue banken) en soms ontgonnen in ondergrondse winningen boven grondwaterniveau, mogelijkheid tot het oplossen van het carbonaathoudend bindmiddel ;
- Formaties van het boven Eoceen (Tertiair) :
 - o Ieperiaan (Y) :
 - bovenaan (Yd) (Tielt), zeer fijne zanden, groen (glauconiet), kleiig met kleilenzen ;
 - onderaan (Yc) (Kortrijk), kleien die soms zandig zijn, soms plastisch van 50 tot 70 m dikte in het westen.
 - o Landeniaan (L) (Tienen (L2) et Hannut (L1)), zanden en kleien van 40 tot 60 m dikte ;
- Formaties van het Krijt (Secundair), Krijt van het Campaniaan (Cp3), 65 tot 80 m ;
- Formaties van het Cambrium (Primair) Devillium , kwartsofylladen, fyladen ;

9.2. ONTWERPVERSLAG

- Omschrijving (adres, omstandigheden, klant, ...)
- Omschrijving van de geologie en hydrogeologie van de site
- Beschrijving van de geotechniek
- Beschrijving van de buurt
- Selectie van de bemalingsmethode
- Samenvatting van de parameters gebruikt om de capaciteit van de pomp(en) en de zettingen te berekenen

Parameters	Waarde	Beschrijving
Lengte van de ontgraving		Afhankelijk van het project
Breedte van de ontgraving		Afhankelijk van het project
Piëzometrische grondwaterstand (statisch)		Veldmeting
Diepte van de ontgraving		Afhankelijk van het project
Diepte van de grondwaterverlaging		0,5 m onder laagste niveau van de ontgraving
Vereiste grondwaterverlaging		Grondwaterstand op snijvlak van de diepte van de grondwaterverlaging
Doorlatendheid		Documentatie of meting
Gewicht van de verzadigde bodem		Documentatie of meting
Gewicht van de droge bodem		Documentatie of meting
Poriëngetal /porositeit		Documentatie of meting
Compressie-index		Documentatie of meting

- Ontwikkeling van de analytische oplossing
- Beschrijving van het ontwerp
- Evaluatie van de mogelijke impact
- Wijze waarop de impact te beperken
- Toezicht en controle vereist

9.3. BESLISSINGSBOOM

Gevoeligheidsklasse van de site (geologie)	A	Zeer gevoelig
	B	Gemiddeld gevoelig
	C	Weinig gevoelig
Nabijheid van infrastructuur	1	Gevoelig
	2	Potentieel
	3	Geen infrastructuur
Diepte van de ontgraving	Ondiep	0-3 m
	Gemiddeld	3 m-10 m
	Diep	>10 m
Implementatiemethode	i	Open putbemaling
	ii	Indammen / waterkering
	iii	Onttrekkingsputten

Gevoeligheidsklasse		Nabijheid van infrastructuur	Bemalingsmethode	Diepte van de ontgraving	Hydraulische studie	Studie van de zettingen	Peilbuizen	Laboproef	Veldtest	Piezometrie turbiditeit, zoutgehalte, Ec	Controle vervorming
C		1,2	i	Ondiep	A	A	X	Aanbevolen	-		
			i, ii, iii	Gemiddeld	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
				Diep	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
		3	i	Ondiep	A	A	X	Aanbevolen	-		
			i, ii, iii	Gemiddeld	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
				Diep	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
B		1,2	i	Ondiep	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
			i, ii, iii	Gemiddeld	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
				Diep	B	B	X	Aanbevolen	Pomptest	*	*
		3	i	Ondiep	A	A	X	Aanbevolen	-		
			i, ii, iii	Gemiddeld	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
				Diep	A	B	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
A		1,2	i	Ondiep	B	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
			ii, iii		B	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
			i, ii, iii	Gemiddeld	B	B	X	Aanbevolen	Pomptest	*	*
				Diep	B	B	X	Aanbevolen	Pomptest	*	*
		3	i	Ondiep	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
			ii, iii		A	A	X	Aanbevolen	Slug Test		
			i	Gemiddeld	A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
			ii, iii		A	A	X	Aanbevolen	Slug Test	*	*
			i	Diep	B	B	X	Aanbevolen	Pomptest	*	*
			ii, iii		B	B	X	Aanbevolen	Pomptest	*	*

A Eenvoudig model

B Opstellen van een numeriek model

X Voor een ontgraving met een oppervlakte van minder dan 1000m³, wordt aanbevolen om 3 proefboringen te doen waarvan 2 tot op 1,5 keer de diepte van de ontgraving en 1 tot op 2 maal de diepte van de ontgraving.

Laboproef : minstens 1 staal per geologische laag wordt aanbevolen (oedometerproef, doorlaatbaarheid, korrelverdeling)

* Aanbevolen metingen

Peilbuizen: installatie van een monitoring netwerk van 4 peilbuizen in de 4 windrichtingen rond de ontgraving.